

T S2/5/1

2/5/1

DIALOG(R)File 351:Derwent WPI

(c) 2004 Thomson Derwent. All rts. reserv.

014707496 **Image available**

WPI Acc No: 2002-528200/200256

Related WPI Acc No: 2001-008732; 2002-490895

XRPX Acc No: N02-418183

Optical projection system for extreme ultraviolet lithography comprises first mirror group forming intermediate image and second mirror group to focus image on semiconductor wafer

Patent Assignee: ZEISS SMT AG CARL (ZEISS); ZEISS SEMICONDUCTOR MFG CARL (ZEISS)

Inventor: HUDYMA R; MANN H

Number of Countries: 023 Number of Patents: 004

Patent Family:

Patent No	Kind	Date	Applicat No	Kind	Date	Week
WO 200248796	A2	20020620	WO 2001EP14301	A	20011206	200256 B
EP 1342128	A2	20030910	EP 2001270809	A	20011206	200367
			WO 2001EP14301	A	20011206	
JP 2004516500	W	20040603	WO 2001EP14301	A	20011206	200436
			JP 2002550445	A	20011206	
KR 2004024536	A	20040320	KR 2003707857	A	20030612	200445

Priority Applications (No Type Date): US 2000255161 P 20001212

Patent Details:

Patent No Kind Lan Pg Main IPC Filing Notes

WO 200248796 A2 E 35 G03F-007/20

Designated States (National): JP KR US

Designated States (Regional): AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LU MC NL PT SE TR

EP 1342128 A2 E G03F-007/20 Based on patent WO 200248796

Designated States (Regional): AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC NL PT SE TR

JP 2004516500 W 61 G02B-017/00 Based on patent WO 200248796

KR 2004024536 A G03F-007/20

Abstract (Basic): WO 200248796 A2

NOVELTY - The concave mirror pair (M1, M2) with aperture stop (APE) form an intermediate image (IMI) of the e.g. reflective mask or reticle object (OB) with approximately -0.8x magnification. These image rays are reflected from convex, concave, convex, and concave mirrors (M3-M6) with a approximately -0.3x group magnification and 4x reduction to be telecentrically reflected at concave mirror (M6) to focus on the image (IM) where a semiconductor wafer is located.

DETAILED DESCRIPTION - The system is designed to project a ring field format with extreme ultraviolet (EUV) or soft X-rays. The mirror M1 has 25 microns maximum peak departure and the other mirrors have low-risk aspheres with departures between 0.5-14 microns. The numerical aperture (NAO) at the object is 0.050 rads giving an image NA of 0.20 at the image at 4x reduction. The ring field is centered at 118 mm from the optical axis and extends from 114 mm to 122 mm forming an arcuate slit with an 8 mm width. The object/image distance is 1500 mm or less.

USE - EUV lithography.

ADVANTAGE - The very low incidence angles are between 2.9degrees and 12.5degrees, and are well controlled so the design is compatible with EUV or soft X-ray multilayer coatings. They are a key enabling element for EUV lithography since they minimize the multilayer induced

amplitude and phase errors, and enable simplified coating designs not reliant on heavy use of laterally graded coating profiles. Utilizes mirrors with low peak aspheric departure facilitating visible light metrology testing without a null lens or computer generated hologram (CGH), resulting in high accuracy surface figure testing. Can achieve 30 nm lithographic performance resolution assuming a 0.5 k1-factor. The aperture stop location gives very small third order astigmatism contribution from the strong concave secondary mirror. Aberration correction and balance reduces the composite RMS wavefront error to between 0.017-0.011lambda. May be scaled in numerical aperture or field.

DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The drawing shows a plan view of the EUV optical projection system.

First group concave mirror pair (M1, M2)

Second group convex mirrors (M3, M5)

Second group concave mirrors ((M4, M6))

Aperture stop (APE)

Object, intermediate image and image (OB, IMI, IM)

pp; 35 DwgNo 1/4

Title Terms: OPTICAL; PROJECT; SYSTEM; EXTREME; ULTRAVIOLET; LITHO;
COMPRISE; FIRST; MIRROR; GROUP; FORMING; INTERMEDIATE; IMAGE; SECOND;
MIRROR; GROUP; FOCUS; IMAGE; SEMICONDUCTOR; WAFER

Derwent Class: P81; P84; U11

International Patent Class (Main): G02B-017/00; G03F-007/20

International Patent Class (Additional): G21K-001/06; G21K-005/02;

H01L-021/027

File Segment: EPI; EngPI

?

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2004-516500

(P2004-516500A)

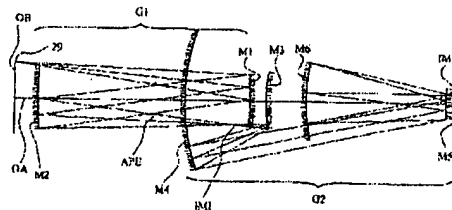
(43) 公表日 平成16年6月3日(2004. 6. 3)

(51) Int. Cl. ⁷	F I	テーマコード (参考)
G02B 17/00	G02B 17/00 A	2H087
G03F 7/20	G03F 7/20 503	2H097
G21K 1/06	G21K 1/06 G	5F046
G21K 5/02	G21K 5/02 X	
H01L 21/027	H01L 21/30 531A	
審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 61 頁) 最終頁に続く		
(21) 出願番号 特願2002-550445 (P2002-550445)	(71) 出願人 501481425	
(86) (22) 出願日 平成13年12月6日 (2001. 12. 6)	カール ツァイス エスエムデー アーゲー	
(85) 翻訳文提出日 平成15年6月6日 (2003. 6. 6)	ドイツ連邦共和国、 73447 オベル	
(86) 国際出願番号 PCT/EP2001/014301	コッヘン、 カール・ツァイス・ストラッ	
(87) 国際公開番号 W02002/048796	セ 22	
(87) 国際公開日 平成14年6月20日 (2002. 6. 20)	(74) 代理人 100089037	
(31) 優先権主張番号 60/255, 161	弁理士 渡邊 隆	
(32) 優先日 平成12年12月12日 (2000. 12. 12)	(74) 代理人 100064908	
(33) 優先権主張国 米国 (US)	弁理士 志賀 正武	
(81) 指定国 EP (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), JP, KR, US	(74) 代理人 100108453	
	弁理士 村山 靖彦	
	(74) 代理人 100110364	
	弁理士 実広 信哉	
	最終頁に続く	

(54) 【発明の名称】 EUVリソグラフィ用の投影系

(57) 【要約】

EUV投影光学系は、物体OBを像IMに結像するための少なくとも6つの反射面を備えている。この光学系は、物体OBから像IMに至る光路に沿って第2の反射鏡M2と第3の反射鏡M3の間に中間像IMIを形成するように構成され、第1の反射鏡M1と第2の反射鏡M2とで第1の光学群G1を形成し、第3の反射鏡M3、第4の反射鏡M4、第5の反射鏡M5および第6の反射鏡M6で第2の光学群G2を形成する。また、この光学系は、好ましくは物体OBから像IMまでの前記光路に沿って第1の反射鏡M1と第2の反射鏡M2の間に位置する開口絞りAPEも備えている。第2の反射鏡M2は凹面状、第3の反射鏡M3は凸面状とされていることが好ましい。6つの反射面はそれぞれ、略15°未満の入射角で、フィールド中心点からの主光線CRを受けることが好ましい。この光学系は、像IMにおいて0.18を超える開口数を有していることが好ましい。



【特許請求の範囲】

【請求項1】

物体 (OB、OB'、OB'') を像 (IM、IM'、IM'') に結像するための少なくとも6つの反射面を備えるEUV投影光学系であって、物体 (OB、OB'、OB'') から像 (IM、IM'、IM'') までの光路に沿って第2の反射鏡 (M2、M2'、M2'') と第3の反射鏡の間に中間像 (IMI、IMI'、IMI'') を形成するように構成され、第1の反射鏡 (M1、M1'、M1'') と第2の反射鏡 (M2、M2'、M2'') とで第1の光学群 (G1、G1'、G1'') を形成し、第3の反射鏡 (M3、M3'、M3'')、第4の反射鏡 (M4、M4'、M4'')、第5の反射鏡 (M5、M5'、M5'') および第6の反射鏡 (M6、M6'、M6'') で第2の光学群を形成し、前記第2の反射鏡 (M2、M2'、M2'') は凹面状とされ、前記第3の反射鏡 (M3、M3'、M3'') は凸面状とされている光学系。

【請求項2】

前記物体 (OB、OB'、OB'') から前記像 (IM、IM'、IM'') までの前記光路に沿って前記第1の反射鏡 (M1、M1'、M1'') と前記第2の反射鏡 (M2、M2'、M2'') の間に位置する開口絞り (APE、APE'、APE'') をさらに備えてなることを特徴とする請求項1に記載の光学系。

【請求項3】

前記開口絞り (APE、APE'、APE'') は、前記第1の反射鏡 (M1、M1'、M1'') 上以外に配置されているとともに、前記開口絞り (APE、APE'、APE'') は、前記第2の反射鏡 (M2、M2'、M2'') 上以外に配置されていることを特徴とする請求項1または請求項2に記載の光学系。

【請求項4】

光軸 (OA'') が物体面と像面の間に規定され、フィールド中心点 (29) からの主光線 (CR'') が、前記第2の反射鏡 (M2'') と前記第3の反射鏡 (M3'') の間を伝搬する間に前記光軸 (OA'') に向かって収束するようにさらに構成されていることを特徴とする請求項1から請求項3のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項5】

光軸 (OA') が物体面と像面の間に規定され、フィールド中心点 (29) からの主光線 (CR') が、前記第2の反射鏡 (M2') と前記第3の反射鏡 (M3') の間を伝搬する際に前記光軸 (OA') と略平行に伝搬するようにさらに構成されていることを特徴とする請求項1から請求項3のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項6】

前記物体 (OB'、OB'') から前記像 (IM'、IM'') に至る前記光路沿いにある前記第3の反射鏡 (M3'、M3'') は、前記第1の反射鏡 (M1'、M1'') よりも前記物体 (OB'、OB'') に近い位置に物理的に配置されていることを特徴とする請求項1から請求項5のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項7】

光軸 (OA) が物体面と像面の間に規定され、フィールド中心点 (29) からの主光線 (CR) が、前記第2の反射鏡 (M2) と前記第3の反射鏡 (M3) の間を伝搬する間に前記光軸 (OA) から発散するようにさらに構成されていることを特徴とする請求項1から請求項3のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項8】

前記物体 (OB) から前記像 (IM) に至る前記光路沿いにある前記第1の反射鏡 (M1) は、前記第3の反射鏡 (M3) よりも前記物体 (OB) に近い位置に物理的に配置されていることを特徴とする請求項1から請求項7のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項9】

前記第1の反射鏡 (M1、M1'、M1'') は凹面状とされ、前記第4の反射鏡 (M4、M4'、M4'') は凹面状とされ、前記第5の反射鏡 (M5、M5'、M5'') は凸面状とされ、前記第6の反射鏡 (M6、M6'、M6'') は凹面状とされていることを特徴と

する請求項1から請求項8のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項10】

前記6つの反射面のそれぞれは、前記物体(OB、OB'、OB'')と前記像(IM、IM'、IM'')の間に配置され、前記物体(OB、OB'、OB'')と前記像(IM、IM'、IM'')の間の物理的距離が略1500mm以下とされていることを特徴とする請求項1から請求項9のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項11】

前記6つの反射面のそれぞれは、前記物体(OB'')と前記像(IM'')の間に配置され、前記物体(OB'')と前記像(IM'')の間の物理的距離が略1200mm以下とされていることを特徴とする請求項1から請求項10のいずれか1項に記載の光学系。

10

【請求項12】

前記像(IM、IM'、IM'')において0.18を超える開口数を有していることを特徴とする請求項1から請求項11のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項13】

前記6つの反射面のそれぞれは、略15°未満、好ましくは略13°未満の入射角で、フィールド中心点(29)からの主光線(CR、CR'、CR'')を受けけるように設けられていることを特徴とする請求項1から請求項12のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項14】

前記6つの反射面のうち5つは、略11°未満、好ましくは略9°未満の入射角で、フィールド中心点(29)からの主光線(CR、CR'、CR'')を受けけるように設けられていることを特徴とする請求項1から請求項13のいずれか1項に記載の光学系。

20

【請求項15】

0.017λ以下のRMS波面収差を有するように構成されていることを特徴とする請求項1から請求項14のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項16】

0.017λから0.011λの間のRMS波面収差を有するように構成されていることを特徴とする請求項1から請求項15のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項17】

物体(OB、OB'、OB'')を像(IM、IM'、IM'')に結像するための少なくとも6つの反射面を備えるEUV投影光学系であって、前記光学系が、物体(OB、OB'、OB'')から像(IM、IM'、IM'')までの光路に沿って第2の反射鏡(M2、M2'、M2'')と第3の反射鏡の間に中間像(IMI、IMI'、IMI'')を形成するように構成され、第1の反射鏡(M1、M1'、M1'')と第2の反射鏡(M2、M2'、M2'')とで第1の光学群(G1、G1'、G1'')を形成し、第3の反射鏡(M3、M3'、M3'')、第4の反射鏡(M4、M4'、M4'')、第5の反射鏡(M5、M5'、M5'')および第6の反射鏡(M6、M6'、M6'')で第2の光学群を形成し、前記6つの反射面のそれぞれは、略15°未満、好ましくは略13°未満の入射角で、フィールド中心点(29)からの主光線(CR、CR'、CR'')を受け、前記像(IM、IM'、IM'')において0.18を超える開口数を有するように構成されている光学系。

30

40

【請求項18】

前記6つの反射面のうち5つは、略11°未満、好ましくは略9°未満の入射角で、フィールド中心点(29)からの主光線(CR、CR'、CR'')を受けけるように設けられていることを特徴とする請求項17に記載の光学系。

【請求項19】

光軸(OA'')が物体面と像面の間に規定され、前記フィールド中心点(29)からの主光線(CR'')が、前記第2の反射鏡(M2'')と前記第3の反射鏡(M3'')の間を伝搬する間に前記光軸(OA'')に向かって収束するようにさらに構成されていることを特徴とする請求項17または請求項18に記載の光学系。

【請求項20】

50

前記物体 (OB'、OB'') から前記像 (IM'、IM'') に至る前記光路沿いにある前記第3の反射鏡 (M3'、M3'') は、前記第1の反射鏡 (M1'、M1'') よりも前記物体 (OB'、OB'') に近い位置に物理的に配置されていることを特徴とする請求項17から請求項19のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項21】

光軸 (OA) が物体面と像面の間に規定され、前記フィールド中心点 (29) からの主光線 (CR) が、前記第2の反射鏡 (M2) と前記第3の反射鏡 (M3) の間を伝搬する間に前記光軸 (OA) から発散するようにさらに構成されていることを特徴とする請求項17から請求項20のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項22】

前記物体 (OB) から前記像 (IM) に至る前記光路沿いにある前記第1の反射鏡 (M1) は、前記第3の反射鏡 (M3) よりも前記物体 (OB) に近い位置に物理的に配置されていることを特徴とする請求項17から請求項21のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項23】

前記第2の反射鏡 (M2、M2'、M2'') は凹面状とされ、前記第3の反射鏡 (M3、M3'、M3'') は凸面状とされていることを特徴とする請求項17から請求項22のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項24】

前記6つの反射面のそれぞれは、前記物体 (OB、OB'、OB'') と前記像 (IM、IM'、IM'') の間に配置され、前記物体 (OB、OB'、OB'') と前記像 (IM、IM'、IM'') の間の物理的距離が略1500mm以下とされていることを特徴とする請求項17から請求項23のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項25】

前記6つの反射面のそれぞれは、前記物体 (OB'') と前記像 (IM'') の間に配置され、前記物体 (OB'') と前記像 (IM'') の間の物理的距離が略1200mm以下とされていることを特徴とする請求項17から請求項24のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項26】

物体 (OB、OB'、OB'') を像 (IM、IM'、IM'') に結像するための少なくとも6つの反射面と、前記物体 (OB、OB'、OB'') から前記像 (IM、IM'、IM'') までの光路に沿って第1の反射鏡 (M1、M1'、M1'') と第2の反射鏡 (M2、M2'、M2'') の間に位置する開口絞り (APE、APE'、APE'') とを備えるEUV投影光学系であって、前記第2の反射鏡 (M2、M2'、M2'') は凹面状とされ、前記第3の反射鏡 (M3、M3'、M3'') は凸面状とされている光学系。

【請求項27】

前記開口絞り (APE、APE'、APE'') は、前記第1の反射鏡 (M1、M1'、M1'') 上以外に配置されているとともに、前記開口絞り (APE、APE'、APE'') は、前記第2の反射鏡上以外に配置されていることを特徴とする請求項26に記載の光学系。

【請求項28】

前記6つの反射面のそれぞれは、略15°未満、好ましくは略13°未満の入射角で、フィールド中心点 (29) からの主光線 (CR、CR'、CR'') を受けるように設けられていることを特徴とする請求項26または請求項27に記載の光学系。

【請求項29】

前記6つの反射面のうち5つは、略11°未満、好ましくは略9°未満の入射角で、フィールド中心点 (29) からの主光線 (CR、CR'、CR'') を受けるように設けられていることを特徴とする請求項26から請求項28のいずれか1項に記載の光学系。

【請求項30】

物体 (OB'') を像 (IM'') に結像するための少なくとも6つの反射面と、前記物体 (OB'') から前記像 (IM'') までの光路に沿って第1の反射鏡 (M1'') と第2の反射鏡 (M2'') の間に位置する開口絞り (APE'') とを備えるEUV投影光学系であって

、フィールド中心点(29)からの主光線(CR")が、前記第2の反射鏡(M2")と第3の反射鏡(M3")の間を伝搬する間に前記光軸(OA)に向かって収束するように構成されている光学系。

【請求項31】

前記物体(OB")から前記像(IM")に至る前記光路沿いにある前記第3の反射鏡(M3")は、前記第1の反射鏡(M1")よりも前記物体(OB")に近い位置に物理的に配置されていることを特徴とする請求項30に記載の光学系。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

10

本発明は、極短紫外線(EUV)リソグラフィ用の投影光学系に関し、特に、2つの光学的な群に配列された6個の反射鏡を備える投影光学系に関する。

【0002】

【従来の技術】

ステップ&スキャン型で使用される現在の深紫外線(DUV)投影転写光学系は、次の二、三のデバイスの節目までは半導体産業の要求に応えることができるであろうと広く認められている。次世代のフォトリソグラフィ転写光学系では、約11nmから15nmという軟X線または極短紫外線の波長を有する露光照射光を、やはりステップ&スキャン型の転写アーキテクチャで使用するようになる。費用の面で実現可能とするためには、これらの次世代光学系では、70nm以下の集積回路線幅に対応できるだけの大きな開口数が必要となる。さらに、こうしたフォトリソグラフィ光学系は、経済的にプロセスを実行できるように十分に高いスループット(1時間当たりのウェハ数で定義される)を確保するため、スキャン方向に大きな視野が必要になろう。

【0003】

リソグラフィ転写光学系の理論上の解像度(R)は、 $R = k_1 \lambda / NA$ という周知の関係で表すことができる。ここで、 k_1 はプロセスに依存する定数、 λ は光の波長、NAは投影系の開口数である。EUVレジストが大体0.5の k_1 因子に対応することが分かっているため、開口数が0.20であると仮定すれば、EUV投影系は、 $\lambda = 13.4$ nmで約30nm程度の理論解像度を達成することができる。本発明において分かることは、International Sematech's International Technology Roadmap for semiconductors(1999)によって規定されるようなサブ50nm線幅世代に対処するために、大きな開口数(0.20~0.30)および大きな視野(2~30mm)の両方を有するステップ&スキャン・アーキテクチャに用いられるEUVリソグラフィ用の全反射型投影系が望ましいということである。

【0004】

JewelおよびHudymaにそれぞれ発行された米国特許第5315629号および米国特許第6226346号に開示されているような4反射鏡投影系では、30nmの設計基準(線幅)を達成するのに十分な大きさのNA上で収差を補正するために必要となる自由度が欠けている。第346号特許は、0.14(50nm線幅)までの開口数で収差を補正するのに、4反射鏡投影系を用いることができることを示唆している。しかしながら、リングフィールド(ring field)の幅は、リソグラフィに望ましい水準の波面補正を可能にするために狭くすることが望ましい。第346号特許は、開口数を0.10から0.12に増加させたときにリングフィールドが1.5mmから1.0mmに縮小されることを実際に示している。第346号特許の第2の実施形態でさらに倍率変更を行うことによって、開口数をさらに0.14まで増加させる際にリングフィールドが0.5mmまで縮小されるはずであることが示されている。このようにリングフィールドの幅を縮小すると、投影装置全体のスループットを低下させることに直結する。明らかに、さらなる改善が必要である。

【0005】

50

Hudymaに発行された米国特許第6072852号明細書に記載されているような5反射鏡系は、瞳に依存した収差ならびにフィールドに依存した収差の双方を補正するのに十分な自由度を有するので、有意なフィールド幅(>1.5mm)で0.20を超える開口数が可能である。反射回数を最小限に抑えることは、特にEUVリソグラフィにとっていくつか利点がある反面、反射回数が奇数回であると、無限の平行スキャンを可能にするために新段階の技術が開発される必要が出てくるであろうという問題が生じる。ここで分かることは、既存の走査ステージ技術でマスクおよび像の無限の同時平行スキャンを可能にするように光学系を「展開」するために、追加の反射鏡が投影系に組み込まなければならないという点である。

【0006】

10

6回以上の反射を利用する短波長投影リソグラフィ用の光学系が特許文献に開示されている。このような初期の系の1つは、「Reflecting optical imaging apparatus using spherical reflectors and producing an intermediate image」と題するIchiharaおよびHiguchiに授与された米国特許第5071240号明細書に開示されている。この第240号特許は、球面反射鏡を利用した6反射鏡反射光学系または全反射縮小光学系を開示している。この特定の実施形態は、3つの反射鏡対で構築されており、平坦なフィールド条件(flat field condition)を実現するために正/負(P/N)および負/正(N/P)の組合せを使用している。IchiharaおよびHiguchiも、最初の反射鏡対と最後の反射鏡対の間で中間像を利用する光学系で平坦なフィールド結像条件(ベッツヴァル和がゼロ)を実現できることを実証している。この特許は、第2の凸面反射鏡を、この反射鏡と同じ場所に配置した開口絞りとともに使用することを開示している。これらの実施形態を検討すれば明らかであるが、第240号特許は、約10nmの波長で作用する反射コーティングと確実に併用できるように、各反射鏡面で小さな入射角を使用する点も開示している。

【0007】

第240号特許に開示された実施形態は、特定の目的を達成するようには思われても、極短紫外線の波長を利用する現在のリソグラフィにはこれらの例は十分に適していない。第1に、これらの光学系は非常に長く(~3000mm)、機械的安定性の問題を有している。第2に、これらの実施形態は、最新の半導体リソグラフィ転写光学系で望まれるような、像側でのテレセントリックな結像に対応していない。最後に、開口数がかなり小さく(~0.05)、光学系が依然として30nmの線幅に対応できない。

【0008】

最近、EUVリソグラフィ用に特に設計された少なくとも6回の反射を使った大開口数を提供する投影光学製造システムが開示された。このような光学系の1つは、Williamsonに授与された「High numerical aperture ring field optical projection system」と題する米国特許第5815310号明細書に開示されている。この第310号特許に、Williamsonは、EUV照射光で使用するための6反射鏡リングフィールド投影系を記載している。各反射鏡は非球面であり、共通の光軸を共有している。この特定の実施形態では、開口数は0.25であり、 k_1 に対して堅実な値(~0.6)を用いれば、30nmリソグラフィが可能である。この第310号特許は、PNPPNPおよびPPPPNPのいずれの再結像する構成も、第3の反射鏡と第4の反射鏡の間に位置する物理的にアクセス可能な中間像によって可能であることを示唆している。この特定の実施形態は、長い方の共役点から短い方の共役点に向かって順に、凹面反射鏡、凸面反射鏡、凹面反射鏡、凹面反射鏡、凸面反射鏡および凹面反射鏡、あるいは略式にPNPPNPからなる。この第310号特許は、PNPPNPのパワー分布およびPPPPNPのパワー分布がともに30nmの設計基準を達成できることを示している。

【0009】

第310号特許に開示の好ましいEUV実施形態には、いくつかの欠点がある。その1 50

つは、各鏡面における入射角が大きく、特に反射鏡M2およびM3において大きいことである。場合によっては、入射角は、反射鏡上の所定の位置で 24° を超える。反射鏡面上の所定の地点における平均角度ならびに角度偏差ないし角度ひろがりはいずれも、限界寸法(CD制御)に悪い影響を与えかねないEUV多層コーティングに起因した振幅および位相への目立った影響を引き起こすには十分である。

【0010】

その他2つのリソグラフィ用の反射光学系または全反射投影系が、Shaferに発行された「Projection lithography system and method using all-reflective optical elements」と題する米国特許第5686728号明細書に開示されている。この第728号特許には、100nmを超える波長で使用するための、約0.50の開口数を有する8反射鏡投影系および約0.45の開口数を有する6反射鏡投影系が記載されている。いずれの光学系も、5倍の縮小比で縮小するように動作する。第310号特許に記載の光学系と同様に、これらの光学系は、円弧状のフィールド内におけるリソグラフィ性能をもたらす良好な光学補正の環状ゾーンを有している。これらの光学系は、DUVリソグラフィ用に設計されたものであり、DUVリソグラフィの用途に対しては優れていても、EUV投影系ではこれらの実施形態は極めて低品質にしかない。開口数を0.50から0.25に低下させた後でも、光束の入射角はマスクを備えたどの反射鏡でも非常に大きく、Mo/Si多層膜またはMo/Be多層膜のどれと組み合わせてもこの光学系は使うことができない。さらに、反射鏡上の非球面偏差(aspheric departure)および非球面勾配(aspheric gradient)はともにEUV波長に比べてかなり大きく、このような非球面反射鏡をEUVリソグラフィで望まれる精度で測定することができるかどうか疑問が残る。以上の問題点を念頭に置けば、第728号特許は、明らかに上記の反射光学系または全反射投影系がEUV波長で用いられることを述べていないどころか、むしろこれらの使用をより長いDUV波長に限定している。

【0011】

EUVリソグラフィで使用するための別の投影系が、Hudymaに発行された米国特許第6033079号明細書に開示されている。「High numerical aperture ring field projection system for extreme ultraviolet lithography」と題されたこの第079号特許には、2つの好ましい実施形態が記載されている。第079号特許に記載された第1の実施形態は、長い共役から短い共役に向かって順に、凹面反射鏡面、凹面反射鏡面、凸面反射鏡面、凹面反射鏡面、凸面反射鏡面および凹面反射鏡面(PPNPNP)と配列されている。第079号特許の第2の実施形態は、長い共役から短い共役に向かって順に、凹面反射鏡面、凸面反射鏡面、凸面反射鏡面、凹面反射鏡面、凸面反射鏡面および凹面反射鏡面(PNNPNP)を有する。第079号特許は、第4の反射鏡と第5の反射鏡の間に位置する物理的にアクセス可能な中間像によって、PPNNPNPおよびPNNPNPの再結像する構成がいずれも有利であることを示している。第240号特許および第310号特許と同様の方法で、第079号特許は、第2の反射鏡の位置にある開口絞り、および第2の反射鏡を通過後に光軸から発散する主光線を使用する点について開示している。

【0012】

第079号特許は、第3の凸面反射鏡を使用することにより、低次の非点収差を大幅に低減させることができることを開示している。光学的なパワーのこの特定の配列は、大きな入射角またはきわめて大きな非球面偏差を使用せずに高水準の収差補正を達成するのに有利である。両実施形態において、全ての非球面偏差は $15\mu\text{m}$ 未満であり、そのほとんどは $10\mu\text{m}$ 未満である。第240号特許と同様に、第079号特許も、各反射面で小さな入射角を使用することによって、EUVに関する重要な示唆を行なっている。PPNNPNPパワー配列およびPNNPNPパワー配列により入射角を小さくすることができ、これにより簡単かつ効率的なEUV反射鏡コーティングが可能となる。入射角を小さく

すると、コーティングによって引き起こされる射出瞳における振幅の変動が最小限に抑えられ、またコーティングによって引き起こされる射出瞳における位相または光路差 (OPD) の変動が最小限に抑えられ、光学系の感度許容差が一般に低下させられるように機能する。これらの要因は、ピント合わせと露光に変動がある場合に、透過率の改善とCD一様性の向上とを促進させるように結びつく。

【0013】

【発明が解決しようとする課題】

従来技術の投影光学系は、多くの応用分野に適していることが分かっているが、それらは設計上の妥協点がないわけではなく、全ての応用分野で最適な解決策を提供することはできない。したがって、50 nm以下の解像度で比較的大きなイメージフィールドを有し、
極短紫外線 (EUV) または軟X線の波長領域で使用可能な投影光学系が求められている。

【0014】

【課題を解決するための手段】

上記に鑑みて、物体を像に結像するための少なくとも6つの反射面を備えるEUV投影光学系を提供する。この光学系は、物体から像までの光路に沿って第2の反射鏡と第3の反射鏡の間に中間像を形成するように構成され、第1の反射鏡と第2の反射鏡とで第1の光学群を形成し、第3の反射鏡、第4の反射鏡、第5の反射鏡および第6の反射鏡で第2の光学群を形成するようになっている。第2の反射鏡は凹面状であり、第3の反射鏡は凸面状である。

【0015】

この光学系はさらに、物体から像までの光路に沿って第1の反射鏡と第2の反射鏡の間に位置する開口絞りを備えることができる。この開口絞りは、第1の反射鏡および第2の反射鏡のそれぞれから離して配置することができる。

【0016】

この光学系はさらに、フィールド中心点からの主光線が、第2の反射鏡と第3の反射鏡の間を伝搬する際に光軸に向かって収束する、または光軸と略平行に伝搬するように構成することができる。第1の反射鏡は、第3の反射鏡よりも物体に近い位置に物理的に配置することができる。

【0017】

この光学系はさらに、フィールド中心点からの主光線が、第2の反射鏡と第3の反射鏡の間を伝搬する際に光軸から発散するように構成することができる。第3の反射鏡は、第1の反射鏡よりも物体に近い位置に物理的に位置することができる。

【0018】

第1の反射鏡は凹面状であることが好ましく、第4の反射鏡は凹面状であることが好ましく、第5の反射鏡は凸面状であることが好ましく、第6の反射鏡は凹面状であることが好ましい。

【0019】

物体と像との間の物理的距離は、略1500 mm以下にすることができ、さらに、略1200 mm以下にすることができ。

【0020】

この光学系は、像の位置での開口数が0.18より大きいことが好ましい。

【0021】

6つの反射面はそれぞれ、略15°未満、好ましくは略15°未満の入射角で、フィールド中心点からの主光線を受けることが好ましく、6つの反射面のうち5つは、略11°未満、好ましくは略9°未満の入射角で、フィールド中心点からの主光線を受けることが好ましい。

【0022】

この光学系は、0.017 λ 以下のRMS波面収差を有するように構成されることが好ましく、RMS波面収差は0.017 λ から0.011 λ の間にすることもできる。

【0023】

以下に挙げるものは、上記の発明の背景および概要で挙げたものに加わる参考文献の引用リストである。ここで、これらの引用文献は、以下では特に詳細に述べていない好ましい実施形態の要素ないし特徴の代替実施形態を開示するものとして、参照により好ましい実施形態の詳細な説明に組み込まれる。これらの引用文献のいずれか1つ、またはそのうちの2つ以上の組合せを調べて、以下で述べる好ましい実施形態の変形形態を得ることができ。さらに、発明の背景および／または本明細書のその他の箇所で引用した特許、特許出願、非特許文献、およびそれらについての考察もまた、参照により好ましい実施形態の詳細な説明に組み込まれ、以下に記載する参考文献と同じ効果を有する。

【0024】

米国特許第5063586号明細書、米国特許第5071240号明細書、米国特許第5078502号明細書、米国特許第5153898号明細書、米国特許第5212588号明細書、米国特許第5220590号明細書、米国特許第5315629号明細書、米国特許第5353322号明細書、米国特許第5410434号明細書、米国特許第5686728号明細書、米国特許第5805365号明細書、米国特許第5815310号明細書、米国特許第5956192号明細書、米国特許第5973826号明細書、米国特許第6033079号明細書、米国特許第6014252号明細書、米国特許第6188513号明細書、米国特許第6183095号明細書、米国特許第6072852号明細書、米国特許第6142641号明細書、米国特許第6226346号明細書、米国特許第6255661号明細書、および米国特許第6262836号明細書。

【0025】

欧州特許出願公開第0816892号明細書、および欧州特許出願公開第0779528号明細書。

【0026】

J. M. Rodgers、T. E. Jewellによる「Design of Reflective Relay for Soft X-Ray Lithography」、International Lens Design Conference、1990年。

【0027】

T. E. Jewell、J. M. Rodgers、K. P. Thompsonによる「Reflective Systems design Study for Soft X-Ray Projection Lithography」、J. Vac. Sci. Technol.、1990年11月/12月。

【0028】

T. E. Jewellによる「Optical System Design Issues in Development of Projection Camera for EUV Lithography」、SPIE Volume 2437、340 - 347ページ。

【0029】

W. C. Sweattによる「Ring-Field EUVL Camera with Large Etendu」、OSA TOPS on Extreme Ultraviolet Lithography、1996年。

【0030】

G. E. Sommargarenによる「Phase Shifting Diffraction Interferometry for Measuring Extreme Ultraviolet Optics」、OSA TOPS on Extreme Ultraviolet Lithography、1996年。

【0031】

D. W. Sweeney、R. Hudyma、H. N. Chapman、D. Shaferによる「EUV Optical Design for a 100nm CD Imaging System」、SPIE Volume 3331、2 - 10ページ。

【0032】

【発明の実施の形態】

この投影光学系に関する3つの特別な好ましい実施形態について述べる。

【0033】

第1の好ましい実施形態

図1は、第1の好ましい実施形態の平面図であり、表1および表2と合わせてこの実施形態を具体的に説明するものである。光は、照明系から例えば反射性マスクやレチクルなどの物体に入射し、凹面反射鏡M1に向けて送られ、その後反射鏡M1で反射し、反射鏡M1と反射鏡M2の間に位置する物理的にアクセス可能な開口絞りAPEを通過する。この開口絞りAPEは、第1の凹面反射鏡M1からかなり隔たって位置し、この開口絞りAPEは、凹面反射鏡M2からも同様にかなり隔たって位置している。この照明光は、凹面反射鏡M2で反射した後で、凸面反射鏡M3に近接して位置する中間像IMIで集束する。照明光は、反射鏡M3から凹面反射鏡M4に向けて送られ、ここで概ねコリメートされ、凸面反射鏡M5に向けて送られる。反射鏡M5で反射すると、光は凹面反射鏡M6に入射し、ここでテレセントリックに反射され（主光線が光軸OAと平行になる）、像IMに集束される。半導体ウェハは、通常は、この像IMの位置に配置される。凹形状の光学面は、正の光学的なパワー（P）を有し、凸形状の光学面は、負の光学的なパワー（N）を有するので、この実施形態は、PPNPNPとして特徴付けることができる。

【0034】

この光学系を特徴付ける方法は数多くあるが、容易な方法の1つは、光学系を2つの群G1およびG2に分けることである。物体OBから始まって、第1の群G1は、凹面反射鏡対M1およびM2からなる。この群は、反射鏡M2と反射鏡M3の間に、約-0.8倍の倍率で中間像IMIを形成する。残り4つの反射鏡（凸面反射鏡M3、凹面反射鏡M4、凸面反射鏡M5および凹面反射鏡M6）によって、第2の結像群ないしリレー群G2が構成される。この第2の群は、約-0.3倍の倍率で働き、像IMにおいて物体OBを4分の1に縮小する（この縮小比は、光学倍率の絶対値の逆数である）。

【0035】

図1の第1の実施形態の光学的な規定を表1および表2に挙げる。非球面反射鏡面には、表中の記号A(1)からA(6)を付す。A(1)は反射鏡M1に対応し、A(2)は反射鏡M2に対応し、等々、以下全て同様の対応関係になっている。さらに4つの面を加えると、この具体例による代表的な実施形態は完全に記述される。このうち、物体OBおよび像IMは平面を表し、リソグラフィ装置ではマスクおよびウェハが配置される。面の指定は、開口絞りAPEおよび中間像IMIの位置についてもなされている。各面の名称の後側に並んで、頂点の曲率半径（R）および光学面間の頂点間隔を示す項目がさらに2つある。この特定の実施形態では、各面は、高次多項式によって変形した回転対称な円錐面である。非球面断面形状は、非球面のK、A、B、C、DおよびEの値で一意的に決定される。各反射鏡は、4次、6次、8次、10次および12次の多項式の変形を用いている。z軸（z）方向における（12次の）非球面のたわみは、以下の数式1で与えられる：

【数1】

$$z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2h^2}} + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + Eh^{12}$$

ここで、hは径方向の座標、cは面の頂点の曲率（1/R）、A、B、C、DおよびEは、それぞれ4次、6次、8次、10次および12次の変形の係数である。これらの係数は、表2に列挙されている。

【0036】

この第1の好ましい実施形態の光学系は、極短紫外線（EUV）または軟X線照射光で照明されるリングフィールド形状を投影するように構成されている。物体OBにおける開口数NAOは、0.050ラジアンであり、4倍の縮小では、これは像IMにおける開口数NAの0.20に相当する。物体OBにおけるリングフィールド21を図2に示す。これ

は、非球面反射鏡の頂点の各々を含む光軸から118mmのところを中心に有する。このリングフィールドは、114mmから122mmまで延在して、8mmの幅23を持つ円弧状スリットを形成する。スキャン方向27と直交する方向のリングフィールド21の長さ寸法25は、104mmとなる。フィールドの中心点は、符号29で示されている。4倍の縮小では、このリングフィールドは、像においてスキャン方向の幅が2.0mmとなる。

【0037】

光学的パワーを配分して開口絞りAPEを配置した結果、入射角は十分に制御され、これによって、EUVまたは軟X線の多層膜コーティングと併用可能な構成になる。フィールド中心点29からの主光線CRによって測定すると、この光学系は、2.9°から12.5°の範囲の非常に小さな入射角を有している。フィールド中心点29からの主光線CRに関する主光線入射角は、物体で5.2°、M1で6.5°、M2で5.0°、M3で12.5°、M4で5.6°、M5で8.6°、M6で2.9°である。これらの小さな入射角は、EUVリソグラフィを可能にする鍵であるが、それは、(1)これらの小さな入射角が、多層膜によって引き起こされるリソグラフィ性能に悪影響を与える振幅収差および位相収差を最小限に抑え、(2)横方向にグレーデッド化(graded)されたコーティング・プロファイルをそれほど用いなくても済む簡略なコーティング設計を可能にするからである。不備のある構成(すなわちこれらの入射角を最小にすることができない構成)では、こうした多層膜によって引き起こされる振幅収差および位相収差が、公称線幅の20%を優に超える限界寸法(CD)の収差を引き起こして、光学系が製造用途に使用えなくなる恐れがある。

【0038】

入射角が小さいことに加えて、好ましい光学系は、最大非球面偏差の小さな反射鏡を利用することによってますますEUVリソグラフィを容易にする。最大のピーク偏差は、反射鏡M1に含まれる25.0μmである。その他の反射鏡は、0.5μmから14μmの範囲の偏差を有する低リスクの非球面である。反射鏡面の非球面偏差が小さいので、ヌルレンズまたはコンピュータ生成ホログラムCGHが不要で、可視光測定学による試験が容易になり、表面形状試験の精度が高くなる。非常に大きな最大偏差を有する非球面反射鏡は、リソグラフィ性能を実現するために必要な精度で測定することができないので、製造できない。

【0039】

表3は、図1のPPNPNP構成の性能をまとめたものである。この表から、この第1の好ましい実施形態が、30nm程度の解像度のリソグラフィ性能を達成できることが分かる(k1因子は約0.5と仮定)。開口絞りAPEの位置は、凹形状の強い第2の反射鏡M2による3次非点収差の寄与がかなり小さくなるように選択される。大きく下方修正された第1の反射鏡M1による非点収差の寄与は、M1上の非球面偏差によるものであり、M3/M4の組合せによって相殺される。いかなる非球面も持たない光学系を考えると、開口絞りAPEの配置はまた、第1の反射鏡M1および第2の反射鏡M2からの3次のコマ収差および歪曲収差の寄与を効果的に相殺する。第1の反射鏡M1に双曲線型断面形状を加えて、球面収差の寄与、コマ収差の寄与および非点収差の寄与が大幅に下方修正されるようにし、それにより収差の補正をさらに良好にして、残る波面収差(理想基準球面からの偏差)がきわめて小さくなるようにする。実際には、収差補正およびその結果生じる収差バランスにより、合成RMS波面収差は低下してわずか0.0125λ(0.17nm)となり、同時に静的な歪曲もフィールド全体にわたって2nm未満に修正される。

【0040】

この投影光学系には、さらに、図1の光学系の開口数またはフィールドのいずれにおいてもスケール変更することができるという利点がある。例えば、エリアルイメージ(aerial image)の変化を改善するために上記の概念をより大きな開口数に適用し、さほど強くないk1因子を用いながら30nmの解像度を可能にすることが望ましい。簡単なスケール変更実験の結果から、この好ましい実施形態は、より大きな開口数への斯か

るスケール変換に容易に対応することが分かる。どのような変更も加えずに、表3に示す値の20%増しとなる開口数0.24で、合成二乗平均(RMS)波面収差の分析を行った。合成RMS波面収差は、 0.0287λ (0.38 nm) となることが分かった。これはリソグラフィ品質の結像に対応する水準である。

【0041】

図2において、スキャン方向に視野を拡大し、リソグラフィ装置が処理することができる1時間当たりのウェハ数(WPH)を増加させることが望ましい。この考えは、面積が大きくなれば、単位時間当たりに転写することができる円弧状スリットも広くなるというものである。別の簡単なスケール変更実験の結果から、この好ましい実施形態は、フィールド幅の拡大に容易に対応することが分かる。どのような変更も加えずに、表3に示す値の50%増しとなる幅3mmの円弧状スリットについて合成RMS波面収差の分析を行った。合成RMS波面収差は、 0.0285λ (0.38 nm) となることが分かった。これもやはり、リソグラフィ品質の結像に対応する水準である。

【0042】

第2の好ましい実施形態

一般的な実施形態の第2の形態において、PPNPNP構成で配列した6個の反射鏡を備える極短紫外線(EUV)リソグラフィ用の投影光学系が示される。この第2の好ましい実施形態の平面図を、図3に示す。図3は、波長13.4nmでのEUVリソグラフィ用に設計されたPPNPNP構成を示している。第1の好ましい実施形態と同様に、この光学系も再結像しており、第310号特許および第079号特許の実施形態とは異なり、中間像IMI'を第2の反射鏡対の前に位置づけている。この例では、中間像IMI'は、反射鏡M2'と反射鏡M3'の間に位置し、反射鏡M5'における入射角の変動を小さくする一助となっている。この構成では、反射鏡M1'、M2'、M4'およびM6'上の平均入射角も小さくすることができる。これらの小さな入射角は、多層膜との良好な併用可能性を維持するために有利である。開口絞りAPE'は、M1'とM2'の間に位置し、いずれの反射鏡からもかなり離れている。その距離は例えば200mm超となる。

【0043】

第1の好ましい実施形態で概説した特徴の他に、この第2の好ましい実施形態では、第3の反射鏡M3'を、第1の反射鏡M1'の物体側に(すなわち第1の反射鏡M1'より物体OB'に近い位置に)位置づけることができることを開示している。この特徴は、第3の反射鏡は、第1の反射鏡に近接して(第079号特許)、または第1の反射鏡の像側(第310号特許)に位置しなければならないとする従来技術の開示とは大きく異なる。反射鏡M3'をこのように位置づけることにより、物体面OBから像面IMまでの全長(全トラック長)を約250mm短縮することができる。この全トラック長の減少は、第3の反射鏡を第1の反射鏡M1'の像側から第1の反射鏡M1'の物体側に移動させ、次いで反射鏡M1'と反射鏡M6'の間の距離を短縮することによって達成される。また、これにより、第3の反射鏡M3'の見かけの直径を、第1の反射鏡M1'または第2の反射鏡M2'のいずれか一方より小さくすることができる。これらの変更は、第2の反射鏡M2'で反射した主光線の角度条件に影響を与える。従来技術では、フィールド中心点からの主光線は、第2の反射鏡で反射された後で光軸から発散しなければならないと開示している(第号310特許、第079号特許など)が、ここでは、主光線CR'は光軸OA'に対してより平行な状態を考えている。この第2の実施形態では、この主光線CR'は、光軸OA'と全く同じに平行となる。この主光線の角度における変化は、十分に別個の極小点が形成されるよう、この構成における収差バランスに影響を与え、その結果、波面のゼルニケ分解に見られる残りの収差の組は、第1の好ましい実施形態のものとは異なるようになる。

【0044】

図3のこの第2の好ましい実施形態の光学的規定を、表4および表5に挙げる。非球面反射鏡面には、表中の記号A(1)からA(6)を付す。A(1)は反射鏡M1に対応し、A(2)は反射鏡M2に対応し、等々、以下同様の対応関係になっている。

【0045】

第1の好ましい実施形態と同様に、物体OB'は、テレセントリックに結像する光束（像IM'において光軸OA'と平行な主光線）により、4倍の縮小でリングフィールド形状の像IM'に投影される。表6は、その性能をまとめたもので、この好ましい実施形態が波長13.4 nmのリソグラフィ性能を発揮できることを実際に示すものである。第1の実施形態と比較するために、この第2の好ましい実施形態も、像IM'において0.20の開口数NAを用い、スキャン方向に幅2 mmのフィールドを投影する。この光学系は、各反射鏡における入射角が比較的小さいので、反射性多層膜コーティングと併用可能である。フィールド中心点29'からの主光線CR'によって測定すると、入射角は、3.9°から14.6°の範囲となる。フィールド中心点29'からの主光線CR'についての正確な主光線入射角は、物体OB'で5.6°、M1で7.2°、M2で4.4°、M3で14.6°、M4で8.8°、M5で9.7°、M6で3.9°である。この場合もやはり、これらの小さな入射角は、多層膜によって引き起こされるリソグラフィ性能に悪影響を与える振幅収差および位相収差を最小限に抑えるので、EUVリソグラフィを可能にする鍵である。

【0046】

フィールド全体の合成RMS波面収差は、0.0131λ（0.18 nm）であり、最も良好なフィールド点では0.0095λ（0.13 nm）、最も悪いフィールド点では0.0157λ（0.21 nm）となる。主光線収差は、フィールド全体にわたって1 nm未満に低減されている。テレセントリックな結像、高度に補正された波面、そして概ね皆無の歪曲の組合せが、軟X線または極短紫外線の波長におけるこの光学系の最新のリソグラフィへの適性を明らかに実証している。

【0047】

この好ましい実施形態には、さらに、図3の光学系の開口数またはフィールドのいずれかをスケール変更して、さらに進んだ要求に対応できるという利点がある。簡単な開口数スケール変更実験の結果から、この好ましい実施形態は、より大きな開口数のスケール変更に対応することが分かる。どのような変更も加えずに、表6に示す値の10%増しとなる開口数0.22で、合成二乗平均（RMS）波面収差の分析を行った。合成RMS波面収差は、0.027λ（0.36 nm）となることが分かった。これはリソグラフィ品質の結像に対応する水準である。

【0048】

別の簡単なスケール変更実験の結果から、この好ましい実施形態は、フィールド幅の拡大に対応することが分かる。どのような変更も加えずに、表6に示す値の50%増しとなる幅3 mmの円弧状スリットについて合成RMS波面収差の分析を行った。合成RMS波面収差は、0.028λ（0.38 nm）となることが分かった。これもやはり、リソグラフィ品質の結像に対応する水準である。

【0049】

第3の好ましい実施形態

第3の好ましい実施形態を図4に示す。第1および第2の好ましい実施形態と同様に、この光学系も、第1の反射鏡M1"と第2の反射鏡M2"の間に位置する物理的にアクセス可能な開口絞リAPE"を備えた再結像するPPNPNP構成を用いている。さらに第1および第2の好ましい実施形態と同様に、中間像IMI"は第2の反射鏡M2"と第3の反射鏡M3"の間に位置する。第2の実施形態と同様に、第3の反射鏡M3"は第1の反射鏡M1"の物体側に位置する。この特定の実施形態が第2の好ましい実施形態と異なる点は、フィールド中心点29"からの主光線CR"が第2の反射鏡M2"で反射された後に光軸OA"に向かって収束し、それにより異なる特性を備えた別の有利な投影系を形成することである。

【0050】

図4のこの第3の好ましい実施形態の光学的規定を、表7および表8に挙げる。表7は、頂点の曲率半径ならびにこれらの反射鏡間の光軸に沿った隔たりを示す。各反射鏡は非球

面であり、表中の記号A (1) からA (6) を付す。A (1) は反射鏡M 1" に対応し、A (2) は反射鏡M 2" に対応し、等々、以下同様の対応関係になっている。数式 (1) による非球面の変形の規定を、表 8 に挙げる。表 9 に与えられる内容と合わせて、この好ましい実施形態の例示的な説明を開示する。

【0051】

先の2つの好ましい実施形態と同様に、例えばマスクまたはレチクル上のパターンなどの物体OB" は、テレセントリックに結像する光束（像において光軸と平行な主光線）により、4 倍の縮小でリングフィールド形状の像IM" に投影される。像の位置には、通常は半導体ウェハが配置される。表 9 には、その性能がまとめて示されており、この好ましい実施形態が波長13.4 nmのリソグラフィ性能を発揮できることを実際に示している。10
比較のために、この第3の好ましい実施形態も、像IM" において0.20の開口数NAを利用し、スキャン方向に幅2 mmのフィールドを投影する。この光学系は、各反射鏡における入射角が比較的小さいので、反射性多層膜コーティングと併用可能である。フィールド中心点29" からの主光線CR" によって測定すると、入射角は、3.9° から13.9° の範囲となる。フィールド中心点からの正確な主光線入射角は、物体OB" で6.6°、M1で8.0°、M2で4.4°、M3で13.9°、M4で8.6°、M5で9.6°、M6で3.9° である。この場合もやはり、これらの小さな入射角は、多層膜によって引き起こされるリソグラフィ性能に悪影響を与える振幅収差および位相収差を最小限に抑えるので、EUVリソグラフィを可能にする鍵である。

【0052】

フィールド全体の合成波面収差は、0.0203λ (0.27 nm) であり、最も良好なフィールド点では0.0148λ (0.20 nm)、最も悪いフィールド点では0.0243λ (0.33 nm) となる。主光線収差は、フィールド全体にわたって1 nm未満に低減されている。テレセントリックな結像、高度に補正された波面、そして概ね皆無の湾曲の組合せは、軟X線または極短紫外線の波長におけるこの光学系の最新のリソグラフィへの適性を明らかに実証している。この構成は、第2の好ましい実施形態と同様に、開口数またはフィールドがスケール変更されてもよい。

【0053】

第1から第3の実施形態についての上述の光学的設計の説明は、EUVリソグラフィに有利な反射投影光学系の概念を実際に示すものである。これらの実施形態において、特に13.4 nm用ツールに使うものとして説明したが、その基本的な考え方は、この波長におけるリソグラフィ露光ツールとともに使用することに限定されるものではなく、電磁スペクトル中の軟X線領域に何らかの適したコーティング材料があれば、もっと短い波長でも長い波長でもよい。本発明の具体例の図面ならびに個別の実施形態について述べ、例証してきたが、本発明の範囲は、考察を行なったこれら特定の実施形態に限定されるものではないことを理解されたい。したがって、これらの実施形態は限定的なものではなく具体例と見なされるべきもので、当業者なら、特許請求の範囲およびその均等物に記載されるような本発明の観点を逸脱することなく、これらの実施形態に様々な変更を加えることが可能であろうことを理解されたい。例えば、当業者なら、本明細書に記載の実施形態を再構成して、視野の拡大または開口数の増大あるいはそのいずれをも行い、解像度またはスループットの改善を達成することができる。 30 40

【0054】

【表1】

表 1. 第 1 の好ましい実施形態の光学的規定

素子番号	頂点の曲率半径	厚さ(mm)	ガラス
物体 OB	無限	806.775	
A(1)	-1997.63	-328.184	REFL
開口絞り APE	無限	-399.404	
A(2)	1148.069	649.7918	REFL
中間像 IM1	無限	132.9323	
A(3)	486.7841	-277.569	REFL
A(4)	660.9159	890.6587	REFL
A(S)	393.8628	-476.472	REFL
A(6)	580.3377	501.472	REFL
像 IM			

10

【0055】

【表 2】

表 2. 非球面規定

非球面	K	A	B	C	D	E
A(1)	-9.1388E+01	5.4676E-10	7.0301E-15	-1.4409E-19	2.1657E-25	5.5712E-30
A(2)	-6.4930E-01	3.7924E-11	3.2952E-18	-1.1462E-21	8.4115E-26	-4.9020E-30
A(3)	-2.3288E-01	3.3571E-10	1.8240E-14	-1.9218E-19	-4.2667E-23	2.9468E-27
A(4)	-6.4180E-03	3.9345E-11	1.8257E-16	-6.9023E-22	1.3692E-26	-6.2042E-32
A(5)	1.5857E+00	-1.7764E-09	7.7970E-14	-1.2619E-18	5.4017E-22	-3.8012E-26
A(6)	8.9884E-02	-4.2455E-12	1.4898E-17	1.4824E-22	-7.0550E-28	6.6775E-32

20

【0056】

【表 3】

表 3.第 1 の好ましい実施形態の性能概要

計量対象	性能
波長	13.4 nm
開口数 (像)	0.20
リングフィールド形状 (像)	
i. 半径	30.0 mm
ii. 幅	2.0 mm
iii. 弦	26.0 mm
縮小比 (公称値)	4:1
全長 (mm)	1500 mm
RMS 波面収差 (波@ $\lambda = 13.4$ nm)	
i. 合成	0.0125 λ
ii. 変動	0.0076 $\lambda \sim 0.0167\lambda$
主光線収差(最大)	1.9 nm
射出瞳位置	無限
瞬間開口絞り(ICA)における最大非球面偏差	
i. M1	25.0 μm
ii. M2	0.5 μm
iii. M3	1.4 μm
iv. M4	14.0 μm
v. M5	3.0 μm
vi. M6	3.8 μm

10

20

【0057】

【表4】

表 4.第 2 の好ましい実施形態の光学的規定

索子番号	頂点の曲率半径	厚さ(mm)	ガラス
物体 OB'	無限	786.7828	
A(1)	-1522.9647	-275.3849	REFL
開口絞り APE'	無限	-461.3979	
A(2)	922.8035	452.3057	REFL
中間像 IMI'	無限	95.0000	
A(3)	273.0204	-218.5016	REFL
A(4)	511.1320	834.1959	REFL
A(5)	434.1472	-326.2172	REFL
A(6)	440.9571	363.2172	REFL
像 IM'			

30

40

【0058】

【表5】

表 5.第 2 の好ましい実施形態の非球面規定

非球面	K	A	B	C	D	E
A(1)	-6.5661E-04	3.6028E+01	2.7656E-09	1.3237E-14	5.6475E-20	1.4711E-23
A(2)	1.0837E-03	-3.0142E+00	3.2384E-10	-6.8499E-16	-1.8748E-20	1.0985E-24
A(3)	3.6627E-03	1.9328E+00	-1.6611E-08	-4.9082E-13	2.9169E-17	-3.8673E-21
A(4)	1.9564E-03	-1.2442E-01	-1.0927E-11	2.7712E-16	-2.0608E-21	3.6395E-26
A(5)	2.3034E-03	8.5377E+00	-6.9001E-09	-2.2929E-13	-8.9645E-18	-2.1791E-21
A(6)	2.2678E-03	1.4526E-01	3.2069E-11	3.3003E-16	5.1329E-21	-1.7296E-25

【0059】

10

【表6】

表 6.第 2 の好ましい実施形態の性能概要

計量対象	性能
波長	13.4 nm
開口数(像)	0.20
リングフィールド形状(像)	
i. 半径	30.0 mm
ii. 幅	2.0 mm
iii. 弦	26.0 mm
縮小比(公称値)	4:1
全長(mm)	1250
RMS 波面収差 (波@λ=13.4nm)	
i. 合成	0.0131λ
ii. 変動	0.0095λ~0.0157λ
主光線収差(最大)	0.9 nm
射出瞳位置	無限
瞬間開口絞り(ICA)における最大非球面偏差	
i. M1'	18.0 μm
ii. M2'	6.2 μm
iii. M3'	8.7 μm
iv. M4'	28.0 μm
v. M5'	7.0 μm
vi. M6'	7.0 μm

20

30

【0060】

【表7】

表 7.第 3 の好ましい実施形態の光学的規定

素子番号	頂点の曲率半径	厚さ(mm)	ガラス
物体 OB*	無限	708.2375	
A(1)	-1351.9353	-222.3328	REFL
開口絞り APE*	無限	-435.9047	
A(2)	801.1198	389.5537	REFL
中間像 IM1"	無限	85.9324	
A(3)	257.6903	-223.6826	REFL
A(4)	508.9915	827.9429	REFL
A(5)	434.7744	-321.5090	REFL
A(6)	436.7586	358.5090	REFL
像 IM*			

10

【0061】

【表 8】

表 8.第 3 の好ましい実施形態の非球面規定

非球面	K	A	B	C	D	E
A(1)	-7.3968E-04	1.8042E+00	2.2388E-09	4.0136E-15	6.8479E-19	-1.2865E-22
A(2)	1.2483E-03	-2.6267E+00	4.4819E-10	-1.7571E-15	5.8143E-20	-3.7874E-24
A(3)	3.8806E-03	-8.5604E-01	2.2165E-08	-6.7204E-12	1.1406E-15	-1.0131E-19
A(4)	1.9647E-03	-7.7387E-02	-3.8053E-11	-1.2483E-15	2.8880E-20	-3.4746E-25
A(5)	2.3000E-03	8.3687E+00	-6.1944E-09	-1.9683E-13	-1.6280E-17	4.8296E-21
A(6)	2.2896E-03	1.3269E-01	5.6594E-11	5.5533E-16	-1.1978E-21	7.3097E-25

20

【0062】

【表 9】

表 9.第3の好ましい実施形態の性能概要

計量対象	性能
波長	13.4 nm
開口数 (像 IM")	0.20
リングフィールド形状 (像 IM")	
i. 半径	30.0 mm
ii. 幅	2.0 mm
iii. 弦	26.0 mm
全長 (mm)	1156
縮小比 (公称値)	4:1
RMS 波面収差 (波@ $\lambda = 13.4$ nm)	
i. 合成	0.0203 λ
ii. 変動	0.0148 $\lambda \sim 0.0243\lambda$
主光線収差 (最大)	1.5 nm
射出瞳位置	無限
瞬間開口絞り(ICA)における最大非球面偏差	
i. M1"	17.3 μm
ii. M2"	6.4 μm
iii. M3"	9.7 μm
iv. M4"	32.2 μm
v. M5"	6.7 μm
vi. M6"	6.7 μm

10

20

【図面の簡単な説明】

【図1】第1の好ましい実施形態によるEUV投影光学系の平面図である。

【図2】好ましい実施形態による、物体における円弧状のリングフィールドの幾何形状を示す概略図である。

30

【図3】第2の好ましい実施形態によるEUV投影光学系の平面図である。

【図4】第3の好ましい実施形態によるEUV投影光学系の平面図である。

【符号の説明】

21・・・リングフィールド
 23・・・リングフィールドの幅
 25・・・リングフィールドの長さ
 27・・・スキャン方向 (走査方向)
 29・・・フィールド中心点
 APE、APE'、APE''・・・開口絞り
 CR、CR'、CR''・・・主光線
 G1、G1'、G1''・・・第1の光学群
 G2、G2'、G2''・・・第2の光学群
 IM、IM'、IM''・・・像
 IMI、IMI'、IMI''・・・中間像
 M1、M1'、M1''・・・第1の反射鏡
 M2、M2'、M2''・・・第2の反射鏡
 M3、M3'、M3''・・・第3の反射鏡
 M4、M4'、M4''・・・第4の反射鏡
 M5、M5'、M5''・・・第5の反射鏡
 M6、M6'、M6''・・・第6の反射鏡

40

50

OA 、 OA' 、 OA'' . . . 光軸
 OB 、 OB' 、 OB'' . . . 物体

【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

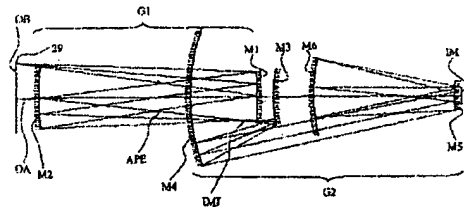
(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau(43) International Publication Date
20 June 2004 (20.06.2004)

PCT

(16) International Publication Number
WO 02/48796 A2

- (51) International Patent Classification: G03F 7/30 (22) HU27MA, Broomfield (US/US), 218 East Edge Drive, San Ramon, CA 94583-4903 (US).
- (12) International Application Number: PCT/EP01/14301 (74) Agent: MÜLLER-REISERMAN, Werner, c/o Carl Zeiss, Jena, 07745 Jena, Germany (DE).
- (13) International Filing Date: 6 December 2001 (06.12.2001) (81) Designated States (national): JP, KR, US.
- (15) Filing Language: English (84) Designated States (regional): European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LU), MC, NL, PT, SE, TR).
- (14) Publication Language: English (85) Designated States (regional): European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LU), MC, NL, PT, SE, TR).
- (30) Priority Data: 49/255,161 12 December 2000 (12.12.2000) US Declaration under Rule 4.17:
— of invention (Rule 4.17(h)) for US only
Published:
— without international search report and to be republished upon receipt of that report
- (71) Applicant (for all designated States except (53)) CARL ZEISS SEMICONDUCTOR MANUFACTURING (US/DE), Technology AG, Carl-Zeiss-Straße, 73446 Oberkochen (DE).
- (72) Inventor: and (73) Inventor/Applicant (for US only): MANN, Hans-Jürgen (DE/DE); Kantenbachstrasse 49, 73447 Oberkochen
- For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Check one Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: PROJECTION SYSTEM FOR EUV LITHOGRAPHY



WO 02/48796 A2

(57) Abstract: An EUV optical projection system includes at least six reflecting surfaces for imaging an object (OB) on an image (IM). The system is preferably configured to form an intermediate image (OI) along an optical path from the object (OB) to the image (IM) between a secondary mirror (M2) and a tertiary mirror (M3), such that a primary mirror (M1) and the secondary mirror (M2) form a first optical group (G1) and the tertiary mirror (M3), a quaternary mirror (M4), a quinary mirror (M5) and a sixth mirror (M6) form a second optical group (G2). The system also preferably includes an aperture stop (AS) located along the optical path from the object (OB) to the image (IM) between the primary mirror (M1) and the secondary mirror (M2). The secondary mirror (M2) is preferably concave, and the tertiary mirror (M3) is preferably convex. Each of the six reflecting surfaces preferably modulates a chief ray (CR) from a central field point at an incidence angle of less than substantially 15°. The system preferably has a numerical aperture greater than 0.18 at the image (IM). The system is preferably configured such that a chief ray (CR) converges toward the optical axis (OA) while propagating between the secondary mirror (M2) and the tertiary mirror (M3).

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

PROJECTION SYSTEM FOR EUV LITHOGRAPHY

5 BACKGROUND OF THE INVENTION:

1. Field of the Invention

The invention relates to an optical projection system for extreme ultraviolet (EUV) lithography, particularly including six mirrors arranged in two optical groups.

10

2. Description of the Related Art

It is widely accepted that current deep ultraviolet (DUV) projection printing systems used in a step and scan mode will be able to address the needs of the semiconductor industry for the next two or three device nodes. The next generation of photolithographic printing systems will use exposure radiation having soft x-ray or extreme ultraviolet wavelengths of approximately 11 nm to 15 nm, also in a step and scan printing architecture. To be economically viable, these next generation systems will require a sufficiently large numerical aperture to address sub 70 nm integrated circuit design rules. Further, these photolithography systems will require large fields of view in the scan direction to ensure that the throughput (defined in terms of wafers per hour) is sufficiently great so that the process is economically viable.

The theoretical resolution (R) of a lithographic printing system can be expressed by the well-known relationship $R = k_1 \lambda / NA$, where k_1 is a process dependent constant, λ is the wavelength of light, and NA is the numerical aperture of the projection system. Knowing that EUV resists support a k_1 -factor of ~0.5 and assuming a numerical aperture of 0.20, an EUV projection system can achieve a theoretical resolution on the order of approximately 30 nm with $\lambda = 13.4$ nm. It is recognized in the present invention that all reflective projection systems for EUV lithography for use in a step and scan architecture having both a large numerical

15
20
25

CONFIRMATION COPY

WD 02/48796

PCT/EP01/14301

aperture (0.20 to 0.30) and a large field (2 to 3 mm) are desired to address the sub-50 nm linewidth generations as defined by the International Sematech's International Technology Roadmap for Semiconductors (1999).

Four-mirror projection systems, such as those described in United States patents no. 5,315,629 and 6,226,348, issuing to Jewel and Hudyma, respectively, lack the degrees of freedom necessary to correct aberrations over a sufficiently large NA to achieve 30 nm design rules. The '348 patent teaches that a four-mirror projection system can be used to correct aberrations at a numerical aperture up to 0.14 (50 nm design rules). However, it is desired that the width of the ring field be reduced to enable wavefront correction to the desired level for lithography. The '348 patent demonstrates that the ring field is reduced from 1.5 mm to 1.0 mm as a numerical aperture is increased from 0.10 to 0.12. Further scaling of the second embodiment in the '348 patent reveals that the ring field must be reduced to 0.5 mm as a numerical aperture is increased further to 0.14. This reduction in ring field width results directly in reduced throughput of the entire projection apparatus. Clearly, further advances are needed.

Five-mirror systems, such as that set forth in United States patent no. 6,072,852, issuing to Hudyma, have sufficient degrees of freedom to correct both the pupil dependent and field dependent aberrations, thus enabling numerical apertures in excess of 0.20 over meaningful field widths (> 1.5 mm). While minimizing the number of reflections has several advantages particular to EUV lithography, an odd number of reflections create a problem in that new stage technology would need to be developed to enable unlimited parallel scanning. To "unfold" the system to enable unlimited synchronous parallel scanning of the mask and image with existing scanning stage technologies, it is recognized herein that an additional mirror should be incorporated into the projection system.

Optical systems for short wavelength projection lithography utilizing six or more reflections have been disclosed in the patent literature. One such early system is disclosed in U.S. Pat. No. 5,071,240, issuing to Ichihara and Higuchi entitled,

WO 02/48796

PCT/JP01/14301

"Reflecting optical imaging apparatus using spherical reflectors and producing an intermediate image." The '240 patent discloses a 6-mirror catoptric or all-reflective reduction system utilizing spherical mirrors. This particular embodiment is constructed with three mirror pairs and uses positive/negative (P/N) and
 5 negative/positive (N/P) combinations to achieve the flat field condition. Ichihara and Higuchi also demonstrate that the flat field imaging condition (zero Petzval sum) can be achieved with a system that utilizes an intermediate image between the first mirror pair and last mirror pair. The patent teaches the use of a convex secondary mirror with an aperture stop that is co-located at this mirror. It is also clear from examination
 10 of the embodiments that the '240 patent teaches the use of low incidence angles at each of the mirror surfaces to ensure compatibility with reflective coatings that operate at wavelengths around 10 nm.

While the embodiments disclosed in the '240 patent appear to achieve their stated purpose, these examples are not well suited for contemporary lithography at
 15 extreme ultraviolet wavelengths. First, the systems are very long (~ 8000 mm) and would suffer mechanical stability problems. Second, the embodiments do not support telecentric imaging at the image which is desired for modern semiconductor lithography printing systems. Lastly, the numerical aperture is rather small (~ 0.05) leaving the systems unable to address 30 nm design rules.

20 Recently, optical projection production systems have been disclosed that offer high numerical apertures with at least six reflections designed specifically for EUV lithography. One such system is disclosed in United States patent number 5,815,310, entitled, "High numerical aperture ring field optical projection system," issuing to Williamson. In the '310 patent, Williamson describes a six-mirror ring field
 25 projection system intended for use with EUV radiation. Each of the mirrors is aspheric and share a common optical axis. This particular embodiment has a numerical aperture of 0.25 and is capable of 30 nm lithography using conservative (~0.6) values for k_1 . The '310 patent suggests that both PNPPNP and PPPPNP re-imaging configurations are possible with a physically accessible intermediate image

WO 02/48796

PCT/EP00/14201

located between the third and fourth mirrors. This particular embodiment consists, from long conjugate to short conjugate, of a concave, convex, concave, concave, convex and concave reflector, or PNPPNP for short. The '310 patent suggests that both PNPPNP and the PPPNP power distributions can achieve 30 nm design rules.

5 The preferred EUV embodiment disclosed in the '310 patent suffers from several drawbacks, one of which is the high incidence angles at each of the mirrored surfaces, particularly on mirrors M2 and M3. In some instances, the angle of incidence exceeds 24° at a given location on the mirror. Both the mean angle and deviation or spread of angles at a given point on a mirror surface is sufficient to cause
10 noticeable amplitude and phase effects due to the EUV multilayer coatings that might adversely impact critical dimension (CD control).

Two other catoptric or all-reflective projection systems for lithography are disclosed in United States patent number 5,686,728 entitled, "Projection lithography system and method using all-reflective optical elements," issuing to Shafer. The '728
15 patent describes an eight mirror projection system with a numerical aperture of about 0.50 and a six-mirror projection system with a numerical aperture of about 0.45 intended for use at wavelengths greater than 100 nm. Both systems operate in reduction with a reduction ratio of 5x. Like the systems described in the '310 patent, these systems have an annular zone of good optical correction yielding lithography
20 performance within an arcuate shaped field. While these systems were designed for DUV lithography and are fine for that purpose, these embodiments make very poor EUV projection systems. Even after the numerical aperture is reduced from 0.50 to 0.25, the incidence angles of the ray bundles are very large at every mirror including the mask, making the system incompatible with either Mo/Si or Mo/Be multilayers. In
25 addition, both the aspheric departure and aspheric gradients across the mirrors are rather large compared to the EUV wavelength, calling into question whether or not such aspheric mirrors can be measured to a desired accuracy for EUV lithography. Recognizing these issues, the '728 patent explicitly teaches away from using

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

catoptric or all-reflective projection systems at EUV wavelengths and instead restricts their use to longer DUV wavelengths.

Another projection system intended for use with EUV lithography is disclosed in U.S. Patent No. 6,033,079, issuing to Hudyma. The '079 patent entitled, "High
5 numerical aperture ring field projection system for extreme ultraviolet lithography," describes two preferred embodiments. The first embodiment that the '079 patent describes is arranged with, from long to short conjugate, a concave, concave, convex, concave, convex, and concave mirror surfaces (PPNPNP). The second preferred embodiment from the '079 patent has, from long to short conjugate, a
10 concave, convex, convex, concave, convex, and concave mirror surfaces (PNNPNP). The '079 patent teaches that both PPNPNP and PNNPNP re-imaging configurations are advantageous with a physically accessible intermediate image located between the fourth and fifth mirror. In a manner similar to the '240 and '310 patents, the '079 patent teaches the use of an aperture stop at the secondary mirror and a chief ray
15 that diverges from the optical axis after the secondary mirror.

The '079 patent teaches that the use of a convex tertiary mirror enables a large reduction in low-order astigmatism. This particular arrangement of optical power is advantageous for achieving a high level of aberration correction without using high incidence angles or extremely large aspheric departures. For both embodiments, all
20 aspheric departures are below 15 μm and most are below 10 μm . Like the '240 patent, the '079 patent makes a significant teaching related to EUV via the use of low incidence angles on each of the reflective surfaces. The PPNPNP and PNNPNP power arrangements promote low incidence angles thus enabling simple and efficient EUV mirror coatings. The low incidence angles work to minimize coating-induced amplitude variations in the exit pupil, minimize coating-induced phase or optical path
25 difference (OPD) variations in the exit pupil, and generally lower the tolerance sensitivity of the optical system. These factors combine to promote improved transmittance and enhanced CD uniformity in the presence of variations in focus and exposure.

WO 02/48704

PCT/EP01/14301

While the prior art projection optical systems have proven adequate for many applications, they're not without design compromises that may not provide an optimum solution in all applications. Therefore, there is a need for a projection optical system that can be used in the extreme ultraviolet (EUV) or soft X-ray wavelength region that has a relatively large image field with capable of sub 50 nm resolution.

SUMMARY OF THE INVENTION:

In view of the above, an EUV optical projection system is provided including at least six reflecting surfaces for imaging an object on an image. The system is configured to form an intermediate image along an optical path from the object to the image between a secondary mirror and a tertiary mirror, such that a primary mirror and the secondary mirror form a first optical group and the tertiary mirror and a fourth mirror, a fifth mirror and a sixth mirror form a second optical group. The secondary mirror is concave, and the tertiary mirror is convex.

The system may further include an aperture stop located along the optical path from the object to the image between the primary mirror and the secondary mirror. This aperture stop may be disposed off each of the first mirror and the second mirror.

The system may be further configured such that a chief ray from a central field point converges toward or propagates approximately parallel to the optical axis while propagating between the secondary mirror and the tertiary mirror. The primary mirror may be physically located closer to the object than the tertiary mirror.

The system may be further configured such that a chief ray from a central field point diverges away from the optical axis while propagating between the secondary mirror and the tertiary mirror. The tertiary mirror may be physically located closer to the object than the primary mirror.

The primary mirror is preferably concave, the fourth mirror is preferably concave, the fifth mirror is preferably convex and the sixth mirror is preferably concave.

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

The physical distance between the object and the image may be substantially 1500 mm or less, and may further be substantially 1200 mm or less.

The system preferably has a numerical aperture at the image greater than 0.18.

- 5 Each of the six reflecting surfaces preferably receives a chief ray from a central field point at an incidence angle of less than substantially 15°, preferably less than substantially 15°, and five of the six reflecting surfaces preferably receives a chief ray from a central field point at an incidence angle of less than substantially 11°, preferably less than substantially 9°.

- 10 The system is preferably configured to have a RMS wavefront error of 0.017λ or less, and may be between 0.017λ and 0.011λ.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS:

- 15 Figure 1 shows a plan view of an EUV optical projection system according to a first preferred embodiment.

Figure 2 schematically illustrates the geometry of the arcuate ring field according to the preferred embodiments at the object.

- 20 Figure 3 shows a plan view of an EUV optical projection system according to a second preferred embodiment.

Figure 4 shows a plan view of an EUV optical projection system according to a third preferred embodiment.

INCORPORATION BY REFERENCE:

- 25 What follows is a cite list of references which, in addition to that which is described in the background and brief summary of the invention above, are hereby incorporated by reference into the detailed description of the preferred embodiments, as disclosing alternative embodiments of elements or features of the preferred

WO 02/48796

PCT/EP01/14361

embodiment not otherwise set forth in detail below. A single one or a combination of two or more of these references may be consulted to obtain a variation of the preferred embodiments described below. Further patent, patent application and non-patent references, and discussion thereof, cited in the background and/or elsewhere herein are also incorporated by reference into the detailed description of the preferred embodiments with the same effect as just described with respect to the following references:

- U.S. patents no. 5,063,588, 5,071,240, 5,078,502, 5,153,698, 5,212,588, 5,220,590, 5,315,629, 5,353,322, 5,410,434, 5,686,728, 5,805,365, 5,815,310, 5,956,192, 5,973,826, 6,033,079, 6,014,252, 6,188,513, 6,183,006, 6,072,852, 6,142,641, 6,226,346, 6,255,661 and 6,262,836;
- European patent applications no. 0 816 882 A1 and 0 779 528 A; and
- "Design of Reflective Relay for Soft X-Ray Lithography", J. M. Rodgers, T.E. Jewell, International Lens Design Conference, 1990;
- 15 "Reflective Systems design Study for Soft X-ray Projection Lithography", T.E. Jewell, J.M. Rodgers, and K.P. Thompson, J. Vac. Sci. Technol., November/December 1990.
- "Optical System Design Issues in Development of Projection Camera for EUV Lithography", T.E. Jewell, SPIE Volume 2437, pages 340-347;
- 20 "Ring-Field EUVL Camera with Large Etendu", W.C. Sweat, OSA TOPS on Extreme Ultraviolet Lithography, 1996; and
- "Phase Shifting Diffraction Interferometry for Measuring Extreme Ultraviolet Optics", G.E. Sommargren, OSA TOPS on Extreme Ultraviolet Lithography, 1996;
- "EUV Optical Design for a 100 nm CD Imaging System", D.W. Sweeney, R. Hudyma, H.N. Chapman, and D. Shafer, SPIE Volume 3331, pages 2-10.
- 25

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS:

Three specific preferred embodiments relating to this optical projection system are described.

First Preferred Embodiment:

Figure 1 shows a plan view of a first preferred embodiment, and, taking in conjunction with Table 1 and Table 2, provides an illustrative, exemplary description of this embodiment. Light impinges on an object, e.g. a reflective mask or reticle from an illumination system and is directed to concave mirror M1 after which it reflects from the mirror M1 and passes through a physically accessible aperture stop APE that is located between Mirror M1 and M2. This aperture stop APE is located a substantial distance from the first concave mirror M1 and, likewise, this aperture stop APE is located a substantial distance from concave mirror M2. After the illumination reflects off concave mirror M2, the light comes to a focus at an intermediate image IMI that is located in close proximity to convex mirror M3. From mirror M3 the illumination is directed toward concave mirror M4 where the light is nearly collimated and directed toward convex mirror M5. Upon reflection from mirror M5, the light impinges on concave mirror M6 where it is reflected in a telecentric manner (the chief rays are parallel to the optical axis OA) and focused on the image IM. A semiconductor wafer is typically arranged at the position of the image IM. Since a concave optical surface has positive optical power (P) and a convex optical surface has negative optical power (N), this present embodiment may be characterized as a PPNPNP configuration.

Although there are many ways to characterize this optical system, one convenient way is to break the system into two groups G1 and G2. Starting at the object OB, the first group G1 is comprised the concave mirror pair M1 and M2. This group forms an intermediate image IMI at a magnification of about -0.8x between

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

mirror M2 and mirror M3. The remaining four mirrors (convex mirror M3, concave mirror M4, convex mirror M5 and concave mirror M6) comprise the second imaging or relay group G2. This second group G2 works at a magnification of approximately -0.3x, resulting in 4x reduction (the reduction ratio is the inverse of the absolute value of the optical magnification) of the object OB at the image IM.

The optical prescription of the first embodiment of Fig. 1 is listed in Table 1 and Table 2. The aspheric mirror surfaces are labeled A(1)-A(6) in the tables with A(1) corresponding to mirror M1, A(2) corresponding to mirror M2, and so on. Four additional surfaces complete the description of this illustrative and exemplary embodiment with object OB and image IM representing the planes, where in a lithographic apparatus the mask and the wafer are arranged. A surface designation is also made for the location of the aperture stop APE and intermediate image IM1. After each surface designation, there are two additional entries listing the vertex radius of curvature (R) and the vertex spacing between the optical surfaces. In this particular embodiment, each of the surfaces is rotationally symmetric conic surface with higher-order polynomial deformations. The aspheric profile is uniquely determined by its K, A, B, C, D, and E values. Each mirror uses 4th, 6th, 8th, 10th, and 12th order polynomial deformations. The sag of the aspheric surface (through 12th order) in the direction of the z-axis (z) is given by:

$$z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2h^2}} + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + Eh^{12}$$

where h is the radial coordinate; c is the vertex curvature of the surface (1/R); and A, B, C, D, and E are the 4th, 6th, 8th, 10th, and 12th order deformation coefficients, respectively. These coefficients are listed in Table 2.

The optical system of this first preferred embodiment is designed to project a ring field format that is illuminated with extremely ultraviolet (EUV) or soft X-ray radiation. The numerical aperture NAO of the object OB is 0.050 radians; at a 4x

WD 02/48796

PCT/EP01/14301

reduction this corresponds to a numerical aperture NA of 0.20 at the image IM. The ring field 21 at the object OB is shown with Figure 2. It is centered at 118 mm from the optical axis, which contains the vertex of each of the aspheric mirrors. This annular field extends from 114 mm to 122 mm forming an arcuate slit with a width 23 of 8 mm. The extent 25 of the ring field 21 perpendicular to the scan direction 27 becomes 104 mm. The central field point is denoted with the reference sign 29. At 4x reduction, this ring field becomes 2.0 mm wide in the scan direction at the image.

As a result of the distribution of optical power and location of the aperture stop APE, the incidence angles are well controlled so that the design is compatible with 10 EUV or soft X-ray multilayer coatings. As measured by the chief ray CR from the central field point 29, this system exhibits very low incidence angles ranging from 2.9° to 12.5°. The chief ray incidence angles for the chief ray CR from the central field point 29 are: Object: 5.2°, M1: 8.9°, M2: 5.0°, M3: 12.5°, M4: 5.6°, M5: 8.6°, and M6: 2.9°. These low incidence angles are a key enabling element for EUV lithography 15 since (1) they minimize the multilayer induced amplitude and phase errors that have an adverse impact to lithographic performance and (2) enable simplified coating designs that do not rely heavily on the use of laterally graded coating profiles. With poor design (i.e., failure to minimize these incidence angles), these multilayer-induced amplitude and phase errors can lead to critical dimension (CD) errors that are easily 20 greater than 20% of the nominal linewidth, making the system unusable for production applications.

Besides the low incidence angles, a preferred system further enables EUV lithography by utilizing mirrors with low peak aspheric departure. The maximum peak departure, contained on mirror M1, is 25.0 μm . The other mirrors have low-risk 25 aspheres with departures that range from 0.5 μm to 14 μm . The low aspheric departures of the mirror surfaces facilitate visible light metrology testing without a null lens or Computer Generated Hologram CGH, resulting in surface figure testing to a high degree of accuracy. An aspheric mirror with a very large peak departure is

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

unproducible because it cannot be measured to the required accuracy to realize lithographic performance.

Table 3 summarizes the performance of the PPNPNP configuration of Fig. 1.

The table demonstrates that this first preferred embodiment is able to achieve

- 5 lithographic performance with a resolution on the order of 30 nm (assuming a k1-factor of approximately 0.5). The location of the aperture stop APE is selected so that the third order astigmatism contribution from the strong concave secondary mirror M2 is made very small. The strongly undercorrected astigmatic contribution from the primary mirror M1 comes from the aspheric departure on M1 and is balanced by the
- 10 M3/M4 combination. Considering the system without any aspheres, the location of the aperture stop APE also effectively balances the third-order coma and distortion contributions from the primary mirror M1 and secondary mirror M2. A hyperbolic profile is added to the primary mirror M1 in such a way as to create a large undercorrected spherical contribution, coma contribution, and astigmatism
- 15 contribution, thus promoting good aberration correction allowing the residual wavefront error (departure from the ideal reference sphere) to remain exceedingly small. In fact, aberration correction and resulting aberration balance reduces the composite RMS wavefront error is only 0.0125λ (0.17 nm), with simultaneous correction of the static distortion to less than 2 nm across the field.

- 20 This optical projection system has further benefits in that the system of Fig. 1 may be scaled in either numerical aperture or field. For example, it is desirable to scale this concept to larger numerical aperture to improve the modulation in the aerial image thus allowing 30 nm resolution with a less aggressive k1-factor. The results of a simple scaling experiment demonstrate that this preferred embodiment easily
- 25 supports such scaling to larger numerical apertures. Without making any modifications, an analysis of the composite root mean square (RMS) wavefront error was made at a numerical aperture of 0.24, which represents a 20% increase to the value shown in Table 2. The composite RMS wavefront error was found to be 0.0287λ (0.38 nm), a level that supports lithographic quality imaging.

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

Referring to Fig. 2, it is desirable to increase the field of view in the scan direction to increase the number of wafers per hour (WPH) that the lithographic apparatus can process. The idea is that more area can be printed per unit time with a wider arcuate slit. The results of another simple scaling experiment demonstrate that this preferred embodiment easily supports increases in field width. Without making any modifications, an analysis of the composite RMS wavefront error was made over a 3 mm wide arcuate slit, which represents a 50% increase to the value shown in Table 2. The composite RMS wavefront error was found to be 0.0285λ (0.38 nm), again a level that supports lithographic quality imaging.

Second Preferred Embodiment

In a second of these general embodiments, an optical projection system for extreme ultraviolet (EUV) lithography including six mirrors arranged in a PPNPNP configuration is disclosed. The plan view of this second preferred embodiment is shown in Figure 3, which demonstrates a PPNPNP configuration designed for EUV lithography at a wavelength of 13.4 nm. Like the first preferred embodiment, the system is reimaging, and unlike the '310 and '079 embodiments, locates the intermediate image (MI) before the second mirror pair. In this example, the intermediate image (MI) is located between mirror M2' and M3', helping to promote low incidence angle variation across mirror M5'. This construction also enables low mean incidence angles on mirror M1', M2', M4', and M6'. These low incidence angles are advantageous for maintaining good multilayer compatibility. The aperture stop APE' is located between M1' and M2' and is significantly spaced from either mirror, e.g., more than 200 mm.

In addition to the features outlined by the first preferred embodiment, this second preferred embodiment teaches that the tertiary mirror M3' may be located on the object side of the primary mirror M1' (i.e., closer to the object OB' than the primary mirror M1'). This feature departs drastically from the teachings of the prior art that

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

show the tertiary mirror must be located either in close proximity to the primary mirror ('079 patent) or on the image side of the primary mirror ('310 patent). This location of mirror M3' enables a reduction in the overall length from object plane OB to image plane IM (total track length) by some 250 mm. This decrease in total track length is accomplished by shifting the tertiary mirror from the image side of the primary mirror M1' to the object side of the primary mirror M1' and then decreasing the distance between mirror M1' and mirror M6'. This also allows the parent diameter of the tertiary mirror M3' to be smaller than either the primary mirror M1' or the secondary mirror M2'. These changes affect the angular condition of the chief rays upon reflection from the secondary mirror M2'. Prior art teaches that the chief ray from the central field point must diverge from the optical axis after reflection from the secondary mirror ('310 patent, '079 patent, etc.), but now the chief ray CR' assumes a more parallel condition with respect to the optical axis OA'. In this second embodiment, this chief ray CR' is made identically parallel to the optical axis OA'.

15 This change in chief ray angle impacts the aberration balance in the design enough to form a distinct local minima, so that the residual aberration set seen in a Zernike decomposition of the wavefront differs from that of the first preferred embodiment.

The optical prescription of this second preferred embodiment of Fig. 3 is listed in Table 4 and Table 5. The aspheric mirror surfaces are labeled A(1)-A(6) in the tables with A(1) corresponding to mirror M1, A(2) corresponding to mirror M2, and so on.

Like the first preferred embodiment, the object OB' will be projected to the image IM' at 4x reduction in a ring field format with a telecentric imaging bundle (chief rays parallel to the optical axis OA' at the image IM'). Table 6 provides a performance summary demonstrating that this preferred embodiment is capable of lithographic performance at a wavelength of 13.4 nm. For comparison to the first embodiment, this second preferred embodiment also utilizes a numerical aperture NA of 0.20 at the image IM' and projects a 2 mm wide field in the scan direction. The system is compatible with reflective multilayer coatings since the incidence angles at

WU 02/48796

PCT/EP01/14301

each mirror are relatively small. As measured by the chief ray CR' from the central field point 29', the incidence angles range from 3.9° to 14.6°. The exact chief ray incidence angles for the chief ray CR' from the central field point 29' are: Object OB': 5.6°; M1: 7.2°; M2: 4.4°; M3: 14.6°; M4: 8.8°; M5: 9.7°, and M8: 3.9°. Again, these low incidence angles are a key enabling element for EUV lithography since the low incidence angles minimize the multiplexer induced amplitude and phase errors that have an adverse impact to lithographic performance.

The composite RMS wavefront error across the field is 0.0131λ (0.18 nm), ranging from 0.0095λ (0.13 nm) at the best field point to 0.0157λ (0.21 nm) at the worst. The distortion of the chief ray has been reduced to less than 1 nm across the field. Clearly this combination of telecentric imaging, a highly corrected wavefront, and essentially no distortion demonstrates that this system is suitable for modern lithography at soft x-ray or extreme ultraviolet wavelengths.

This preferred embodiment has further advantages in that the system of Fig. 3 may be scaled in either numerical aperture or field to address even more advanced requirements. The results of a simple numerical aperture scaling experiment demonstrate that this preferred embodiment easily supports scaling to larger numerical apertures. Without making any modifications, an analysis of the composite root mean square (RMS) wavefront error was made at a numerical aperture of 0.22, which represents a 10% increase to the value shown in Table 4. The composite RMS wavefront error was found to be 0.027λ (0.38 nm), a level that supports lithographic quality imaging.

The results of another simple scaling experiment demonstrate that this preferred embodiment easily supports increases in field width. Without making any modifications, an analysis of the composite RMS wavefront error was made over a 3 mm wide arcuate slit, which represents a 50% increase to the value shown in Table 6. The composite RMS wavefront error was found to be 0.028λ (0.38 nm), again a level that supports lithographic quality imaging.

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

Third Preferred Embodiment:

The third preferred embodiment is shown in Fig. 4. Like the first and second preferred embodiments, this system utilizes a re-imaging PPNNP configuration with a physically accessible aperture stop APE" that is located between the primary mirror M1" and secondary mirror M2". And like the first and second embodiments, the intermediate image IM1" is located between the secondary mirror M2" and the tertiary mirror M3". Similar to the second embodiment, the tertiary mirror M3" is located on the object side of the primary mirror M1". This particular embodiment differs from the second preferred embodiment in that the chief ray CR" from the central field point 28" converges toward the optical axis OA" after reflection from the secondary mirror M2", thus forming another advantageous projection system with distinct characteristics.

The optical prescription for this third embodiment of Fig. 4 is listed in Table 7 and Table 7. Table 7 lists the vertex radius of curvature as well as the separation between these mirrors along the optical axis. Each mirror is aspheric and labeled A(1)-A(5) in the tables with A(1) corresponding to mirror M1", A(2) corresponding to mirror M2", and so on. The prescription of the aspheric surface deformation per equation (1) is listed in Table 8. Taken together with the information provided in Table 9, an illustrative and exemplary description of this preferred embodiment is disclosed.

Like the first two preferred embodiments, the object OB", e.g. a pattern on mask or reticle, will be projected to the image IM1" at 4x reduction in a ring field format with a telecentric imaging bundle (chief rays parallel to the optical axis at the image). At the image IM1" typically a semiconductor wafer is arranged. Table 6 provides a performance summary demonstrating that this preferred embodiment is capable of lithographic performance at a wavelength of 13.4 nm. For comparison purposes, this third preferred embodiment also utilizes a numerical aperture NA of 0.20 at the image IM1" and projects a 2 mm wide field in the scan direction. The system is compatible with reflective multilayer coatings since the incidence angles at each mirror are relatively small. As measured by the chief ray CR" from the central field point 29", the incidence angles range from 3.9° to 13.9°. The exact chief ray incidence angles from the central field point are: Object OB": 6.6°; M1: 8.0°; M2: 4.4°; M3: 13.9°; M4: 8.6°; M5: 9.6°, and M6: 3.9°. Again, these low incidence angles are a key enabling element for EUV lithography since the low incidence angles minimize the multilayer induced amplitude and phase errors that have an adverse impact to lithographic performance.

WO 02/48796

PCT/EP01/14361

The composite wavefront error across the field is 0.0203 λ (0.27 nm), ranging from 0.0148 λ (0.20 nm) at the best field point to 0.0243 λ (0.33 nm) at the worst. The distortion of the chief ray has been reduced to less than 1 nm across the field. Clearly this combination of telecentric imaging, a highly corrected wavefront, and essentially no distortion demonstrates that this system is suitable for modern lithography at soft x-ray or extreme ultraviolet wavelengths. The design can also be scaled in numerical aperture or field like second preferred embodiment.

The optical design descriptions provided above for the first-third embodiments herein demonstrate an advantageous catoptric projection system concept for EUV lithography. While these embodiments have been particularly described for use in a 13.4 nm tool, the basic concept is not limited to use with lithographic exposure tools at this wavelength, either shorter or longer, providing a suitable coating material exists in the soft x-ray region of the electromagnetic spectrum.

While exemplary drawings and specific embodiments of the present invention have been described and illustrated, it is to be understood that the scope of the present invention is not to be limited to the particular embodiments discussed. Thus, the embodiments shall be regarded as illustrative rather than restrictive, and it should be understood that variations may be made in those embodiments by workers skilled in the arts without departing from the scope of the present invention as set forth in the claims that follow, and equivalents thereof. For example, one skilled in the art may reconfigure the embodiments described herein to expand the field of view, increase the numerical aperture, or both, to achieve improvements in resolution or throughput.

WO 02/48796

PC7/E01/14301

Table 1. Optical prescription first preferred embodiment

Element number	Vertex radius of curvature	Thickness (mm)	Glass
Object OB	INFINITY	800.775	
A(1)	-1987.63	-328.184	REFL
Aperture Stop APE	INFINITY	-399.404	
A(2)	1148.068	648.7918	REFL
Intermediate Image IM1	INFINITY	132.9323	
A(3)	456.7841	-277.569	REFL
A(4)	650.9159	890.6587	REFL
A(5)	393.8628	-478.472	REFL
A(6)	580.3377	501.472	REFL
Image IM			

Table 2. Aspheric prescription

Aspheric	K	A	B	C	D	E
A(1)	-8.1588E+01	5.4878E-10	7.0301E-15	-1.4405E-19	2.1857E-25	5.5712E-30
A(2)	-8.4830E-01	3.7924E-11	8.2952E-18	-1.1482E-21	8.4115E-26	-4.9020E-30
A(3)	-2.3288E-01	3.3571E-10	1.8240E-14	-1.8218E-19	-4.2667E-23	2.9488E-27
A(4)	-6.4180E-03	3.6345E-11	1.8267E-16	-8.9023E-22	1.3992E-26	-8.2042E-32
A(5)	1.5857E+00	-1.7784E-09	7.7970E-14	-1.2819E-18	5.4017E-22	-3.8012E-28
A(6)	8.9894E-02	-4.2455E-12	1.4896E-17	1.4824E-22	-7.0550E-28	6.6775E-32

WO 02/45796

PCT/EP01/14361

Table 3. Performance summary first preferred embodiment

Metric	Performance
Wavelength	13.4 nm
Numerical aperture (image)	0.20
Ringfield format (image)	
i. Radius	30.0 mm
ii. Width	2.0 mm
iii. Chord	26.0 mm
Reduction ratio (nominal)	4:1
Overall length (mm)	1500 mm
RMS wavefront error (waves @ $\lambda = 13.4$ nm)	
i. Composite	0.0125 λ
ii. Variation	0.0078 λ - 0.0167 λ
Chief ray distortion (max)	1.9 nm
Exit pupil location	Infinity
Max. aspheric departure across instantaneous clear aperture (ICA)	
i. M1	25.0 μ m
ii. M2	0.5 μ m
iii. M3	1.4 μ m
iv. M4	14.0 μ m
v. M5	3.0 μ m
vi. M6	3.8 μ m

WO 02/48794

PCT/JP01/14301

Table 4. Optical prescription second preferred embodiment

Element number	Vertex radius of curvature	Thickness (mm)	Glass
Object Plane OB'	INFINITY	788.7828	
A(1)	-1522.8947	-275.3848	REFL
Aperture Stop APE	INFINITY	-481.3979	
A(2)	622.8535	452.3057	REFL
Intermediate image IMI'	INFINITY	95.0000	
A(3)	273.0204	-218.5016	REFL
A(4)	511.1320	634.1959	REFL
A(5)	434.1472	-328.2172	REFL
A(6)	440.9571	363.2172	REFL
Image IM'			

Table 5. Aspheric prescription second preferred embodiment

Aspheric	K	A	B	C	D	E
A(1)	-8.5681E-04	-3.6028E+01	2.7956E-09	1.3237E-14	5.8475E-20	1.4711E-23
A(2)	1.0837E-03	-3.0142E+00	3.2384E-10	-6.8486E-16	-1.8748E-20	1.0885E-24
A(3)	3.8627E-03	1.8328E+00	-1.6811E-08	-4.9082E-13	2.9169E-17	-3.6873E-21
A(4)	1.9684E-03	-1.2442E-01	-1.0927E-11	2.7712E-16	-2.0808E-21	3.6395E-26
A(5)	2.3034E-03	8.5377E+00	-8.9001E-09	-2.2929E-13	-8.9445E-18	-2.1791E-21
A(6)	2.2678E-03	1.4526E-01	3.2089E-11	3.3003E-16	8.1329E-21	-1.7296E-25

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

Table 8. Performance summary second preferred embodiment

Metric	Performance
Wavelength	13.4 nm
Numerical aperture (image)	0.20
Ringfield format (image)	
I. Radius	30.0 mm
II. Width	2.0 mm
III. Chord	26.0 mm
Reduction ratio (nominal)	4:1
Overall length (mm)	1250
RMS wavefront error (waves @ $\lambda = 13.4$ nm)	
I. Composite	0.0131 λ
II. Variation	0.0066 λ - 0.0157 λ
Chief ray distortion (max)	0.9 nm
Exit pupil location	Infinity
Max. aspheric departure across instantaneous clear aperture (ICA)	
I. M1'	18.0 μ m
II. M2'	6.2 μ m
III. M3'	8.7 μ m
IV. M4'	25.0 μ m
V. M5'	7.0 μ m
VI. M6'	7.0 μ m

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

Table 7. Optical prescription third preferred embodiment

Element number	Vertex radius of curvature	Thickness (mm)	Glass
Object OB''	INFINITY	708.2375	
A(1)	-1351.9353	-222.3328	REFL
Aperture Stop APE''	INFINITY	-435.9047	
A(2)	801.1198	369.5597	REFL
Intermediate Image IMI''	INFINITY	85.9324	
A(3)	257.8903	-223.8528	REFL
A(4)	508.9915	827.9429	REFL
A(5)	434.7744	-321.5090	REFL
A(6)	438.7588	398.5090	REFL
Image IM''			

Table 8. Aspheric prescription third preferred embodiment

Aspheric	K	A	B	C	D	E
A(1)	-7.3966E-04	1.8042E+00	2.2388E-09	4.0136E-15	6.8479E-18	-1.2885E-22
A(2)	1.2483E-03	-2.6287E+00	4.4819E-10	-1.7571E-15	5.8143E-20	-3.7874E-24
A(3)	3.8806E-03	-8.5804E-01	2.2166E-08	-8.7204E-12	1.1408E-15	-1.0131E-19
A(4)	1.9847E-03	-7.7387E-02	-8.8053E-11	-1.2483E-15	2.8880E-20	-3.4746E-25
A(5)	2.3000E-03	8.9887E+00	-8.1944E-09	-1.9683E-13	-1.6280E-17	4.8298E-21
A(6)	2.2888E-03	1.3288E-01	6.8594E-11	5.5533E-18	-1.1078E-21	7.3097E-25

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

Table 9. Performance summary third preferred embodiment

Metric	Performance
Wavelength	13.4 nm
Numerical aperture (image M")	0.20
Ringfield format (image IM")	
i. Radius	30.0 mm
ii. Width	2.0 mm
iii. Chord	26.0 mm
Overall length (mm)	1156
Reduction ratio (nominal)	4:1
RMS wavefront error (waves @ $\lambda = 13.4$ nm)	
i. Composite	0.0203 λ
ii. Range	0.0148 λ - 0.0243 λ
Chief ray distortion (max)	1.5 nm
Exit pupil location	Infinity
Max. spheric departure across instantaneous clear aperture (ICA)	
i. M1"	17.3 μ m
ii. M2"	8.4 μ m
iii. M3"	9.7 μ m
iv. M4"	32.2 μ m
v. M5"	6.7 μ m
vi. M6"	6.7 μ m

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

WHAT IS CLAIMED IS:

1. An EUV optical projection system, comprising:
 at least six reflecting surfaces for imaging an object (OB, OB', OB'') on an image
 (IM, IM', IM''), and wherein said system is configured to form an intermediate
 image (IM, IM', IM'') along an optical path from the object (OB, OB', OB'') to the
 image (IM, IM', IM'') between a secondary mirror (M2, M2', M2'') and a tertiary
 mirror (M3, M3', M3''), such that a primary mirror (M1, M1', M1'') and the
 secondary mirror (M2, M2', M2'') form a first optical group (G1, G1', G1'') and the
 tertiary mirror (M3, M3', M3'') and a fourth mirror (M4, M4', M4''), a fifth mirror (M5,
 M5', M5'') and a sixth mirror (M6, M6', M6'') form a second optical group (G2, G2',
 G2''), and wherein said secondary mirror (M2, M2', M2'') is concave, and wherein
 said tertiary mirror (M3, M3', M3'') is convex.
- 15 2. The system according to Claim 1, further comprising an aperture stop (APE, APE',
 APE'') located along said optical path from said object (OB, OB', OB'') to said
 image (IM, IM', IM'') between said primary mirror (M1, M1', M1'') and said
 secondary mirror (M2, M2', M2'').
- 20 3. The system according to Claim 1 or 2, wherein said aperture stop (APE, APE',
 APE'') is not located on said first mirror (M1, M1', M1'') and said aperture stop
 (APE, APE', APE'') is not located on said second mirror (M2, M2', M2'').
- 25 4. The system according to at least one of the preceding claims, wherein an optical
 axis (OA'') is defined between an object plane and an image plane, and wherein
 said system is further configured such that a chief ray (CR'') from a central field
 point (29) converges toward said optical axis (OA'') while propagating between
 said secondary mirror (M2'') and said tertiary mirror (M3'').

WD 02/48796

PCT/EP01/14301

5. The system according to at least one of the claims 1 to 3, wherein an optical axis (OA') is defined between an object plane and an image plane, and wherein said system is further configured such that a chief ray (CR') from a central field point (29) propagates approximately parallel to said optical axis (OA') while propagating between said secondary mirror (M2') and said tertiary mirror (M3').
6. The system according to at least one of the preceding claims, wherein said tertiary mirror (M3', M3'') along said optical path from said object (OB', OB'') to said image (IM', IM'') is physically located closer to said object (OB', OB'') than said primary mirror (M1', M1'').
7. The system according to at least one of the claims 1 to 3, wherein an optical axis (OA) is defined between a object plane and a image plane, and wherein said system is further configured such that a chief ray (CR) from a central field point (29) diverges away from said optical axis (OA) while propagating between said secondary mirror (M2) and said tertiary mirror (M3).
8. The system according to at least one of the preceding claims, wherein said primary mirror (M1) along said optical path from said object (OB) to said image (IM) is physically located closer to said object (OB) than said tertiary mirror (M3).
9. The system according to at least one of the preceding claims, wherein said primary mirror (M1, M1', M1'') is concave, said fourth mirror (M4, M4', M4'') is concave, said fifth mirror (M5, M5', M5'') is convex and said sixth mirror (M6, M6', M6'') is concave.
10. The system according to at least one of the preceding claims, wherein each of said six reflecting surfaces is disposed between said object (OB, OB', OB'') and

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

said image (IM, IM', IM''), and wherein a physical distance between said object (OB, OB', OB'') and said image (IM, IM', IM'') is substantially 1500 mm or less.

11. The system according to at least one of the preceding claims, wherein each of
5 said six reflecting surfaces is disposed between said object (OB'') and said image (IM''), and wherein a physical distance between said object (OB'') and said image (IM'') is substantially 1200 mm or less.
12. The system according to at least one of the preceding claims, wherein said
10 system has a numerical aperture greater than 0.18 at the image (IM, IM', IM'').
13. The system according to at least one of the preceding claims, wherein each of the
six reflecting surfaces receives a chief ray (CR, CR', CR'') from a central field
point (29) at an incidence angle of less than substantially 15°, preferably less than
15 substantially 13°.
14. The system according to at least one of the preceding claims, wherein five of the
six reflecting surfaces receives a chief ray (CR, CR', CR'') from a central field
point (29) at an incidence angle of less than substantially 11°, preferably less than
20 substantially 9°.
15. The system according to at least one of the preceding claims, wherein said
system is configured to have a RMS wavefront error of 0.017λ or less.
- 25 16. The system according to at least one of the preceding claims, wherein said
system is configured to have a RMS wavefront error of between 0.017λ and
0.011λ.

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

17. An EUV optical projection system, comprising: at least six reflecting surfaces for imaging an object (OB, OB', OB'') on an image (IM, IM', IM''), and wherein said system is configured to form an intermediate image (IMI, IMI', IMI'') along an optical path from the object (OB, OB', OB'') to the image (IM, IM', IM'') between a secondary mirror (M2, M2', M2'') and a tertiary mirror (M3, M3', M3''), such that a primary mirror (M1, M1', M1'') and the secondary mirror (M2, M2', M2'') form a first optical group (G1, G1', G1'') and the tertiary mirror (M3, M3', M3'') and a fourth mirror (M4, M4', M4''), a fifth mirror (M5, M5', M5'') and a sixth mirror (M6, M6', M6'') form a second optical group (G2, G2', G2''), and wherein each of the six reflecting surfaces receives a chief ray (CR, CR', CR'') from a central field point (2θ) at an incidence angle of less than substantially 15°, preferably less than substantially 13°, and wherein said system has a numerical aperture greater than 0.18 at the image (IM, IM', IM'').
18. The system according to Claim 17, wherein five of the six reflecting surfaces receives a chief ray (CR, CR', CR'') from a central field point (2θ) at an incidence angle of less than substantially 11°, preferably less than substantially 9°.
19. The system according to Claim 17 or 18, wherein an optical axis is defined between an object plane and an image plane, and wherein said system is further configured such that a chief ray (CR'') from a central field point (2θ) converges toward said optical axis (OA'') while propagating between said secondary mirror (M2'') and said tertiary mirror (M3'').
20. The system according to at least one of the claims 17 to 19, wherein said tertiary mirror (M3', M3'') along said optical path from said object (OB', OB'') to said image (IM', IM'') is physically located closer to said object (OB', OB'') than said primary mirror (M1', M1'').

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

21. The system according to at least one of the claims 17 to 19, wherein an optical axis (OA) is defined between a object plane and a image plane, and wherein said system is further configured such that a chief ray (CR) from a central field point (29) diverges away from said optical axis (OA) while propagating between said secondary mirror (M2) and said tertiary mirror (M3).
22. The system according to at least one of the claims 17 to 21, wherein said primary mirror (M1) along said optical path from said object (OB) to said image (IM) is physically located closer to said object (OB) than said tertiary mirror (M3).
23. The system according to at least one of the claims 17 to 22, wherein said secondary (M2, M2', M2'') mirror is concave, and wherein said tertiary mirror (M3, M3', M3'') is convex.
24. The system according to at least one of the claims 17 to 23, wherein each of said six reflecting surfaces is disposed between said object (OB, OB', OB'') and said image (IM, IM', IM''), and wherein a physical distance between said object (OB, OB', OB'') and said image (IM, IM', IM'') is substantially 1500 mm or less.
25. The system according to at least one of the claims 17 to 24, wherein each of said six reflecting surfaces is disposed between said object (OB'') and said image (IM''), and wherein a physical distance between said object (OB'') and said image (IM'') is substantially 1200 mm or less.
26. An EUV optical projection system, comprising:
at least six reflecting surfaces for imaging an object (OB, OB', OB'') on an image (IM, IM', IM''), and an aperture stop (APE, APE', APE'') located along an optical

WO 02/48794

PCT/EP01/14301

path from said object (OB, OB', OB'') to said image (IM, IM', IM'') between a primary mirror (M1, M1', M1'') and a secondary mirror (M2, M2', M2''), and wherein said secondary mirror (M2, M2', M2'') is concave, and wherein said tertiary mirror (M3, M3', M3'') is convex.

- 5
27. The system according to Claim 26, wherein said aperture stop (APE, APE', APE'') is not located on said first mirror (M1, M1', M1'') and said aperture stop (APE, APE', APE'') is not located on said second mirror.
- 10 28. The system according to Claim 28 or 27, wherein each of the six reflecting surfaces receives a chief ray (CR, CR', CR'') from a central field point (29) at an incidence angle of less than substantially 15°, preferably less than substantially 13°.
- 15 29. The system according to at least one of the claims 26 to 28, wherein five of the six reflecting surfaces receives a chief ray (CR, CR', CR'') from a central field point (29) at an incidence angle of less than substantially 11°, preferably less than substantially 9°.
- 20 30. An EUV optical projection system, comprising: at least six reflecting surfaces for imaging an object (OB'') on an image (IM''), and an aperture stop (APE'') located along an optical path from said object (OB'') to said image (IM'') between a primary mirror (M1'') and a secondary mirror (M2''), and wherein said system is configured such that a chief ray (CR'') from a central field point (29) converges toward said optical axis (OA) while propagating between said secondary mirror (M2'') and a tertiary mirror (M3'').
- 25

WO 02/48796

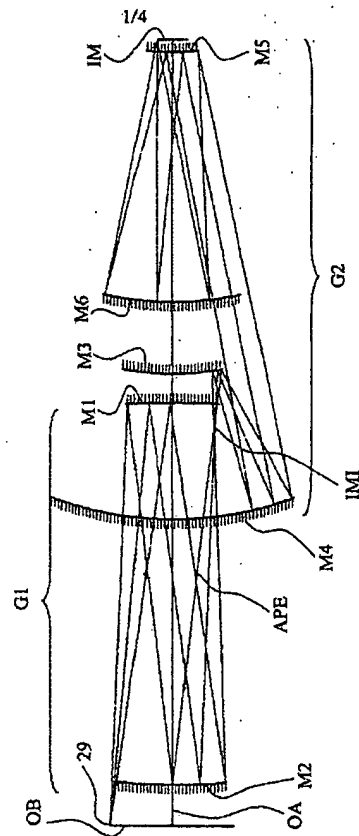
PCT/EP01/14301

31. The system according to Claim 30, wherein said tertiary mirror (M3'') along said optical path from said object (OB'') to said image (IM'') is physically located closer to said object (OB'') than said primary mirror (M1'').

3

WO 02/48796

PCT/EP01/14301

FIG.1

WO 02/48796

PCT/EP02/14301

2/4

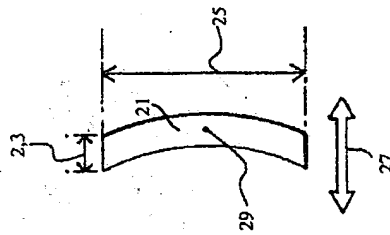
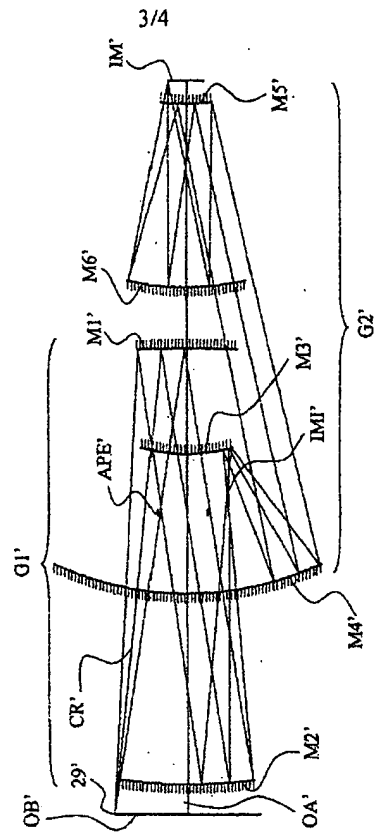


FIG. 2

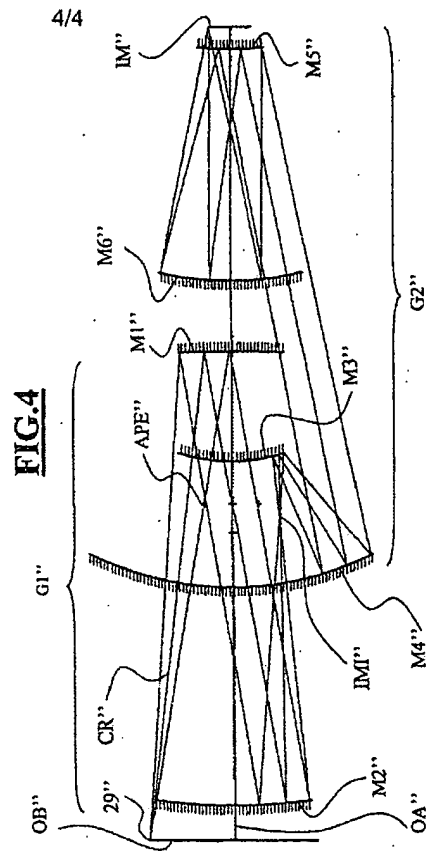
WO 02/48796

PCT/JP01/14301

FIG.3

WO 02/48796

PCT/EP01/14301



【国際公開パンフレット（コレクトバージョン）】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

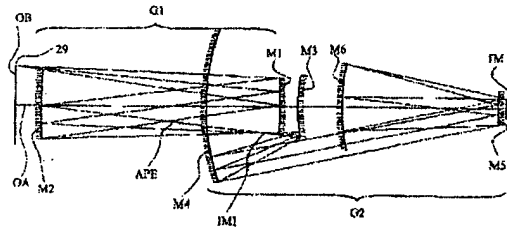
(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau(43) International Publication Date
20 June 2002 (20.06.2002)

PCT

(10) International Publication Number
WO 02/048796 A3

- (51) International Patent Classification: G03F 7/20 (74) Agents: MÜLLER-RISMANN, Werner; c/o Carl Zeiss, Patentabteilung, Carl-Zeiss-Straße, 73446 Oberkochen (DE)
- (31) International Application Number: PCT/EP01/14301 (32) Designated States (national): JP, KR, US
- (33) Designated States (regional): European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR)
- (34) Filing Language: English (35) Publication Language: English
- (36) Priority Date: 12 December 2000 (12.12.2000) US Declaration under Rule 4.17: of Inventorship (Rule 4.17(b)) for US only
- (71) Applicant (for all designated States except US): CARL ZEISS SEMICONDUCTOR MANUFACTURING (1312H); Technologies AG, Carl-Zeiss-Straße, 73446 Oberkochen (DE)
- (72) Inventors and Inventors/Applicants (for US only): MANN, Hans-Jürgen (DE/GB); Kuntzechstr. 49, 73447 Oberkochen (DE); HILBY MA, Richard (USA/US); 218 Lantledge Drive, San Ramon, CA 94583-4025 (US)
- (73) Date of publication of the international search report: 23 January 2002
- For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(64) Title: PROJECTION SYSTEM FOR EUV LITHOGRAPHY



WO 02/048796 A3

(57) Abstract: An EUV optical projection system includes at least six reflecting surfaces for imaging an object (OB) on an image (IM). The system is preferably configured to form an intermediate image (IM1) along an optical path from the object (OB) to the image (IM) between a secondary mirror (M2) and a tertiary mirror (M3), such that a primary mirror (M1) and the secondary mirror (M2) form a first optical group (G1) and the tertiary mirror (M3), a fourth mirror (M4), a fifth mirror (M5) and a sixth mirror (M6) form a second optical group (G2). The system also preferably includes an aperture stop (APE) located along the optical path from the object (OB) to the image (IM) between the primary mirror (M1) and the secondary mirror (M2). The secondary mirror (M2) is concave, and the tertiary mirror (M3) is convex. Each of the six reflecting surfaces preferably receives a chief ray (CR) from a central field point at an incidence angle of less than substantially 15°.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No.
 PCT/EP 81/14391

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G03F/26

According to International Patent Classification (IPC) or to the national classification and IPC

B. FIELD OF SEARCH

Literature searches were searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G03F

Documentation searched other than (IPC) classification in the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the last research search phase of data base and, where possible, search terms used

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Reference to claim No.
Y	DE 199 48 248 A (CARL ZEISS) - 24 August 1980 (1980-08-24) claims 1,2,4,9-11,13,19,26; figure 1	1-29
Y	WO 99 57696 A (KONINKLIJKE PHILIPS ELECTRONICS N.V.) 11 November 1999 (1999-11-11) claims 1,2,5,6; figures 1,2	1-29
A	EP 0 779 528 A (SVG LITHOGRAPHIC SYSTEMS, INC.) 18 June 1997 (1997-06-18) cited in the application claims 1,12; figures 1,2	1-29
E	EP 1 178 356 A (CARL ZEISS) 6 February 1982 (1982-02-06) claims 1,13,14,21,23,24; figures 4,5 -----	1-29

☐ Further documents are listed in the supplementary section G.

☒ Patent family members are listed in section X.

* Several categories of effect classes:

"A" documents exhibiting the general state of the art, which is not considered to be of particular relevance

"B" prior documents but published on or after the international filing date

"C" documents which may have claim on priority claim(s) or which is filed in relation to the possible state of art, in relation to other related subject (in some cases)

"D" documents relating to a technical field, but not related to other subject

"E" documents published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"F" new document published after the international filing date or priority date and not in search with the applicant but not considered to be principles or theory underlying the invention

"G" document of particular relevance. The national invention cannot be considered as prior art. The document is taken into account in the examination of the application.

"H" document of particular relevance. The national invention cannot be considered as prior art. The document is taken into account in the examination of the application.

"I" document of the state of the art.

"J" document of the state of the art.

Date of the status, completion of the international search

Date of entry in the international search report

16 July 1982

12.10.82

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.O. Box 1, 6000 Luxembourg
 L-1011, Luxembourg
 Tel. (352) 4600-1
 Fax (352) 4600-1

Applicant's address

Thiele, N

INTERNATIONAL SEARCH REPORT	
	International Application No. PCT/JP 02/14381
Box I Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of Item 1 of first sheet)	
This International Search Report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:	
1. <input type="checkbox"/>	Claims Nos.: because they relate to subject matter not required to be searched by the Authority, namely:
2. <input type="checkbox"/>	Claims Nos.: because they relate to parts of the International Application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
3. <input type="checkbox"/>	Claims Nos.: because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).
Box II Observations where unity of invention is lacking (Continuation of Item 2 of first sheet)	
This International Searching Authority found multiple inventions in the International Application, as follows:	
see additional sheet	
1. <input type="checkbox"/>	As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this International Search Report covers all searchable claims.
2. <input type="checkbox"/>	As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.
3. <input type="checkbox"/>	As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this International Search Report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
4. <input checked="" type="checkbox"/>	No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this International Search Report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:
1-29	
Remark on Protest	<input type="checkbox"/> The additional search fees were accompanied by the applicant's protest. <input type="checkbox"/> No protest accompanied the payment of additional search fees.

International Application No. PCT/EP 01/14381

FURTHER INFORMATION CONTAINED FROM PCT/ISA/ 218

This International Searching Authority found multiple (groups of) inventions in this international application, as follows:

1. Claims: 1-29

EUV optical projection system with six mirrors, wherein the first two mirrors and mirrors 3 to 6 form an optical group respectively, wherein the second mirror is concave and the third mirror is convex, and wherein an intermediate image is formed between the second and the third mirror; the numerical aperture should be greater than 0.18; an aperture stop should be between the first two mirrors, and a chief ray should diverge away from the optical axis between mirrors 2 and 3.

2. Claims: 30,31

EUV optical projection system with six mirrors, wherein no optical groups of mirrors are defined, and wherein the second mirror does not need to be concave and the third mirror does not need to be convex; an aperture stop is foreseen between mirrors 1 and 2, and a chief ray converges toward the optical path between mirrors 2 and 3.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
 Information on patent family members

International Application No.
 EP 01/14361

Patent document cited by search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 19948248	A 24-08-2000	DE 19948248 A1 EP 1635445 A2 JP 2000235144 A TW 464768 B US 6353478 B1	24-08-2000 13-09-2000 25-08-2000 21-11-2001 05-05-2002
WO 9957606	A 11-11-1999	EP 1004057 A1 WO 9957606 A1 JP 2000250965 A US 6255661 B1	31-05-2000 11-11-1999 26-03-2002 03-07-2001
EP 779528	A 18-06-1997	US 5815310 A CA 2192884 A1 EP 8779528 A2 JP 9211332 A	29-09-1998 13-06-1997 16-06-1997 15-08-1997
EP 1178355	A 06-02-2002	DE 10637870 A1 EP 1178355 A2 JP 2002187639 A US 2002056615 A1	14-02-2002 05-02-2002 10-04-2002 16-05-2002

(see PCT/AL 99/001 for family members)

フロントページの続き

(51)Int.Cl.⁷

F I

テーマコード (参考)

H 0 1 L 21/30 5 1 7

(72)発明者 ハンス-ユルゲン・マン

ドイツ・7 3 4 4 7・オーバーコッヒェン・カッツェンバッハシュトラッセ・4 9

(72)発明者 ラッセル・ハディマ

アメリカ合衆国・カリフォルニア・8 4 5 8 3-4 9 0 5・サン・レイモン・イーストリッジ・ド

ライヴ・2 1 8

Fターム (参考) 2H087 KA21 TA00 TA02 TA06

2H097 CA15 GB01 LA10

5F046 DA12 GA03 GB01